

**EFEKTIVITAS SISTEM KOMBINASI SEKUENSIAL
ELEKTROKOAGULASI–FOTODEGRADASI ZAT WARNA
METILEN BIRU MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$
DENGAN VARIASI KERAPATAN ARUS PADA ELEKTRODA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Oleh:
RIDHA SAFHANI
NIM. 210702057
Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Lingkungan**



**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY
BANDA ACEH
2026 M/1447 H**

LEMBAR PERSETUJUAN

EFEKTIVITAS SISTEM KOMBINASI SEKUENSIAL ELEKTROKOAGULASI-FOTODEGRADASI ZAT WARNA METILEN BIRU MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ DENGAN VARIASI KERAPATAN ARUS PADA ELEKTRODA

TUGAS AKHIR

Diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh
Sebagai Beban Studi Memperoleh Gelar Sarjana dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Diajukan oleh:
RIDHA SAFHANI
NIM. 210702057

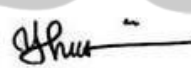
Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Lingkungan

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh:

Pembimbing I


Dr. Sri Nengsih, S.Si., M.Sc.
NIP. 198508102014032002

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Ar-Raniry Banda Aceh


Husnawati Yahya, S.Si., M.Sc.
NIP. 198311092014032002

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

EFEKTIVITAS SISTEM KOMBINASI SEKUENSIAL ELEKTROKOAGULASI-FOTODEGRADASI ZAT WARNA METILEN BIRU MENGGUNAKAN KATALIS $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ DENGAN VARIASI KERAPATAN ARUS PADA ELEKTRODA

TUGAS AKHIR

Telah Diuji Oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir/Skripsi
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh
Dinyatakan Lulus Serta Diterima Sebagai Salah Satu Beban Studi
Program Sarjana (S-1) Dalam Ilmu Teknik Lingkungan.

Pada Hari/Tanggal: Jumat, 23 Januari 2026
Jumat, 4 Syaban 1447 H

Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir/Skripsi

Ketua,


Dr. Sri Nengsih, S.Si., M.Sc.
NIDN. 2010088501

Sekretaris,


Dr. Sri Nengsih, S.Si., M.Sc.
NIDN. 2010088501

Penguji 1


Aulia Robendi, M.Sc.
NIDN. 2010048202

Penguji 2


Ir. Muhammad Haikal, S.T., M.Sc.

Mengetahui,
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Ar-Raniry Banda Aceh




Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU.
NIP. 196210021988111001

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ridha Safhnai

NIM : 210702057

Program Studi : Teknik Lingkungan

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul : Efektivitas Sistem Kombinasi Sekuensial Elektrokoagulasi-
Fotodegradasi Zat Warna Metilen Biru Menggunakan Katalis
 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dengan Variasi Kerapatan Arus Pada Elektroda

Dengan ini menyatakan bahwa dalam penulisan tugas akhir/skripsi ini, saya:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh maupun di perguruan tinggi lainnya
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing
3. Tidak melakukan plagiasi terhadap naskah karya orang lain;
4. Tidak menggunakan karya orang lain tanpa menyebutkan sumber asli atau tanpa izin pemilik karya;
5. Tidak memanipulasi dan memalsukan data;
6. Mengerjakan sendiri karya ini dan mampu bertanggungjawab atas karya ini.

Bila dikemudian hari ada tuntutan dari pihak lain atas karya saya, dan telah melalui pembuktian yang dapat dipertanggungjawabkan dan ternyata memang ditemukan bukti bahwa saya telah melanggar pernyataan ini, maka saya siap dikenai sanksi berdasarkan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Banda Aceh,
Yang Menyatakan



Ridha Safhani

ABSTRAK

Nama : Ridha Safhani
Nim : 210702057
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul : Efektivitas Sistem Terintegrasi Elektrokoagulasi–
Fotodegradasiizatzat Warna Metilen Biru Menggunakan Katalis
 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dengan Variasi Kerapatan Arus Pada Elektroda
Tanggal Sidang : 23 Januari 2026
Jumlah Halaman : 85
Pembimbing : Sri Nengsih, M. Sc.
Kata Kunci : Elektrokoagulasi, Fotodegradasi, Metilen Biru, Katalis,
 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$, Kerapatan Arus, Fotokatalisis, Penyinaran UV

Limbah zat warna metilen biru yang memiliki struktur benzena stabil dan beracun sulit terurai secara alami, sehingga pengelolaannya sangat penting untuk mencegah pencemaran lingkungan. Penelitian ini fokus mengkaji efektivitas sistem terintegrasi elektrokoagulasi dan fotodegradasi untuk menurunkan konsentrasi zat warna metilen biru (MB) menggunakan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ dengan variasi kerapatan arus pada elektroda. Elektrokoagulasi menggunakan plat elektroda aluminium dengan kerapatan arus variasi 10,08, 20,25, dan 30,41 mA/cm^2 serta waktu kontak 30 dan 60 menit dilakukan untuk mengendapkan partikel zat warna. Fotokatalisis dimulai dengan membuat katalis magnetit- TiO_2 dengan rasio massa 2:1. Hasil menunjukkan bahwa kerapatan arus optimal pada 20,25 mA/cm^2 menghasilkan degradasi sebesar 27,3% pada proses elektrokoagulasi. Larutan hasil elektrokoagulasi terbaik kemudian digunakan dalam proses fotokatalisis untuk paparan sinar UV dan tanpa penyinaran selama 30–120 menit. Hasil terbaik dari sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dengan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ didapatkan pada penyinaran UV dengan degradasi tertinggi mencapai 72% yang telah memenuhi baku mutu lingkungan untuk zat warna. Penelitian ini membuktikan kombinasi yang efektif antara elektrokoagulasi dan fotodegradasi dalam menghilangkan zat warna metilen biru secara efisien dan ramah lingkungan.

ABSTRACT

Name : Ridha Safhani
Student ID Number : 210702057
Study Program : Environmental Engineering
Title : Effectiveness Of The Integrated Electrocoagulation–
Photodegradation System Of Methylene Blue Dyes Using
The $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Catalyst With Variations In Electrode Current
Density
Dute of Session : 23 January 2026
Number of Pages 85
Advisor : Sri Nengsih, M. Sc.
Keyword : Electrocoagulation, Photodegradation, Methylene Blue,
 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$, Current Density, Photocatalysis, UV radiation

Methylene blue dye waste, which has a stable benzene structure and is toxic, is difficult to degrade naturally, making its management crucial to prevent environmental pollution. This study focuses on evaluating the effectiveness of an integrated electrocoagulation and photodegradation system to reduce methylene blue (MB) dye concentration using $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ catalyst with varying current densities on the electrodes. Electrocoagulation employed aluminum electrode plates with current density variations of 10.08, 20.25, and 30.41 mA/cm^2 , and contact times of 30 and 60 minutes to flocculate dye particles. Photocatalysis was initiated by preparing $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ catalyst with a 2:1 mass ratio. Results showed that the optimal current density of 20.25 mA/cm^2 achieved 27.3% degradation in the electrocoagulation process. The best electrocoagulation effluent was then used in the photocatalysis process under UV irradiation and without irradiation for 30–120 minutes. The best results from the integrated electrocoagulation-photocatalysis system with $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ catalyst were obtained under UV irradiation, achieving the highest degradation of 72%, which meets environmental quality standards for dyes. This study proves the effective combination of electrocoagulation and photodegradation in efficiently and environmentally friendly removing methylene blue dye.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji hanya bagi Allah Swt. yang senantiasa melimpahkan rahmat, perlindungan, serta segala nikmat-Nya, termasuk nikmat keimanan yang teguh dan kesempurnaan dalam menjalankan Islam. Selawat dan salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita, Nabi Muhammad saw. sosok yang telah menebarkan cahaya ilmu dan akhlak mulia ke seluruh penjuru alam. Tidak lupa pula, selawat dan salam kami haturkan kepada keluarga beliau, para sahabat, serta para ulama yang meneruskan perjuangan beliau, baik yang telah wafat maupun yang masih membimbing umat hingga saat ini. Syukur *Alhamdulillah*, berkat petunjuk dan pertolongan Allah Swt. penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Efektivitas Sistem Kombinasi Sekuensial Elektrokoagulasi–Fotodegradasi zat Warna Metilen Biru Menggunakan Katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Dengan Variasi Kerapatan Arus Pada Elektroda”.

Kepada Ayahanda Alm. Ismail Usman dan Ibunda Azimah selaku orang tua yang sudah menjadi sandaran terkuat untuk penulis, semangat, kasih sayang serta doa selalu mereka berikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini, serta saudara-saudara kandung yang penulis sayangi yang sudah memberikan dukungan, saran, doa dan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Dalam perjalanan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa setiap pencapaian bukanlah hasil dari usaha sendiri, melainkan berkat doa, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak. Maka, dengan kerendahan hati dan rasa syukur yang mendalam, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
2. Ibu Husnawati Yahya, S.Si., M.Sc., selaku Ketua Program studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
3. Bapak Aulia Rohendi, M.Sc., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
4. Bapak Arief Rahman, M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik penulis.

5. Ibu Dr. Sri Nengsih, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah berkenan memberikan nasihat serta arahan agar Tugas Akhir ini disusun dengan sebaik mungkin.
6. Kepada semua pengajar dan staf program studi Teknik Lingkungan di Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, saya mengucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan administratif yang telah diberikan selama proses pembuatan Tugas Akhir ini.

Penulis memahami bahwa pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis. Oleh karena itu, penulis meminta maaf yang sebesar-besarnya atas segala kekurangan tersebut. Penulis sangat berharap bahwa Tugas Akhir ini dapat berguna dan menjadi pedoman serta mempermudah semua pihak yang membaca. Oleh sebab itu, segala masukan dan saran yang konstruktif sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bisa memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.



Banda Aceh, 23 Januari 2026

Penulis,

Ridha Safhani

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
LEMBAR KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Elektrokoagulasi	5
2.1.1 Definisi Elektrokoagulasi	5
2.1.2 Mekanisme Elektrokoagulasi	5
2.1.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Elektrokoagulasi	7
2.1.4 Kerapatan Arus Elektrokoagulasi	8
2.2 Fotokatalisis.....	9
2.3 Fotodegradasi.....	10
2.4 Titanium Dioksida (TiO ₂).....	11
2.5 Magnetit Fe ₃ O ₄	13
2.6 Zat Warna Metilen Biru (MB)	14

2.7 Spektrofotometri UV-Vis	15
2.8 Metode Kopresipitasi.....	16
2.9 Penelitian Terdahulu.....	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Rancangan Penelitian	21
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	22
3.2.1 Waktu Pelaksanaan Penelitian.....	22
3.2.2 Lokasi Penelitian.....	22
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	23
3.3.1 Alat.....	23
3.3.2 Bahan	28
3.4 Prosedur Penelitian.....	29
3.4.1 Teknik Preparasi Pasir Besi.....	29
3.4.2 Teknik sintesis Magnetit Fe_3O_4 dengan Metode Kopresipitasi .	30
3.4.3 Proses Penggabungan Fe_3O_4 - TiO_2	30
3.4.4 Pengujian Katalis Magnetit (Fe_3O_4) – TiO_2	31
3.4.5 Desain Reaktor Elektrokoagulasi	31
3.4.6 Desain Reaktor Fotokatalisis.....	32
3.5 Proses Pembuatan Larutan Metilen Biru	33
3.5.1 Pembuatan Larutan Induk	33
3.5.2 Pembuatan Larutan Standar	33
3.6 Penentuan Nilai Rapat Arus Elektrokoagulasi.....	34
3.7 Tahapan Fotodegradasi dengan Sistem Terintegrasi EC-Fotokatalisis .	35
3.7.1 Fotodegradasi Metilen Biru dengan Metode Elektrokoagulasi .	35
3.7.2 Fotodegradasi Metilen Biru dengan Metode Fotokatalisis.....	35
3.7.3 Diagram Alir Penelitian.....	36

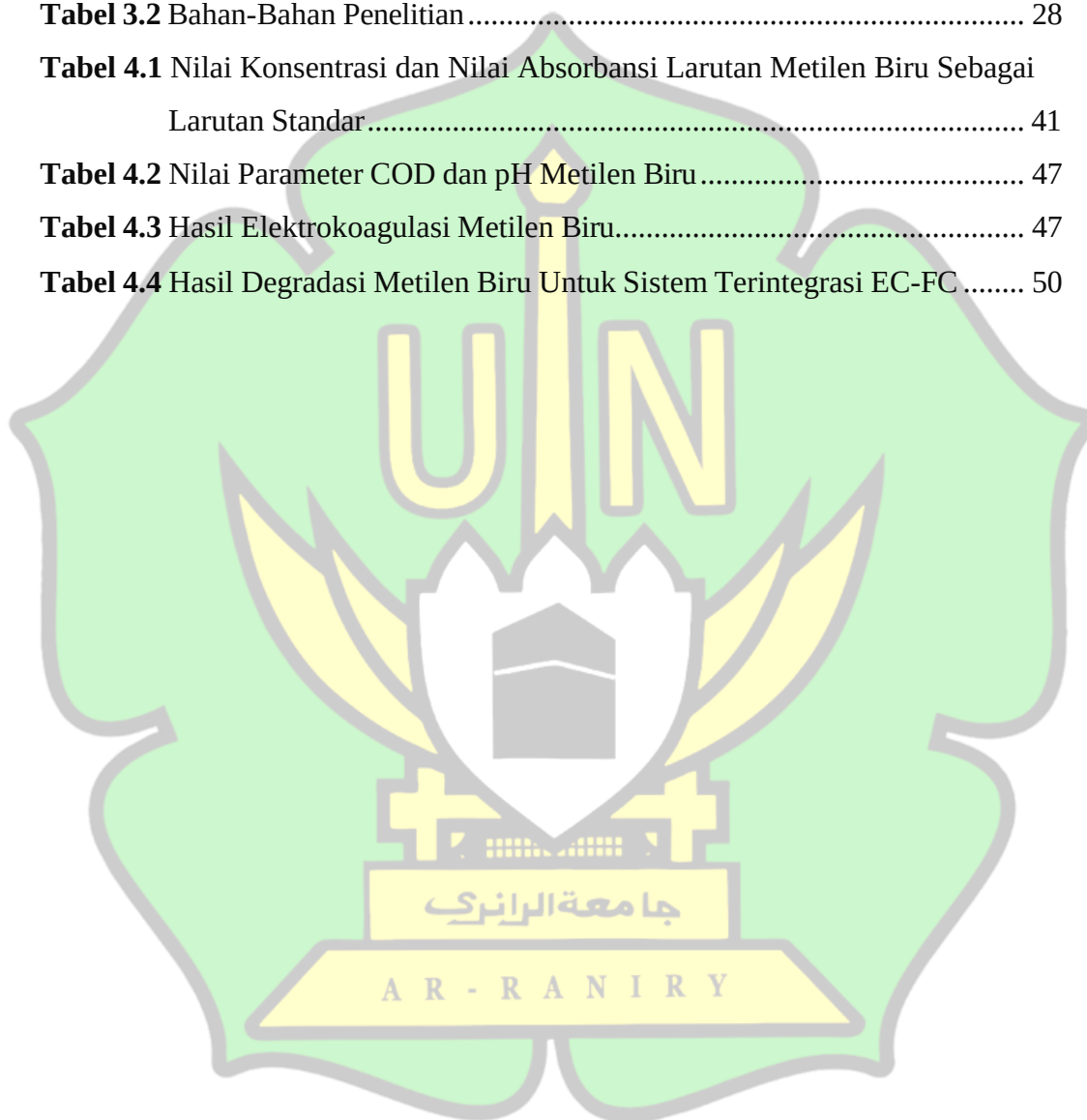
3.8 Analisis Data	37
3.8.1 Efektivitas Elektrokoagulasi dan Fotokatalisis	37
3.8.2 Pengukuran <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	37
3.8.3 Pengukuran <i>Potential of Hydrogen</i> (pH)	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pelaksanaan Penelitian	39
4.1.1 Preparasi dan Sintesis Pasir Besi	39
4.1.2 Proses Penggabungan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$	40
4.3 Penentuan Spektrum Serapan Optik Larutan Zat Warna Metilen Biru.	41
4.3.1 Pengujian COD dan pH Metilen Biru	46
4.4 Analisis Data dan Pembahasan	47
4.4.1 Pengaruh Kerapatan Arus dalam Sistem Elektrokoagulasi	47
4.4.2 Efektivitas Fotodegradasi Metilen Biru pada Sistem Terintegrasi Elektrokoagulasi-Fotokatalisis	49
4.4.3 Pengaruh Waktu Kontak dalam Proses Elektrokoagulasi- Fotodegradasi	51
BAB V PENUTUP	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Proses Elektrokoagulasi.....	7
Gambar 2.2 Skema dari Proses Fotokatalisis.....	10
Gambar 2.3 Bentuk Kristal TiO_2	12
Gambar 2.4 Serbuk Zat Warna Metilen Biru	14
Gambar 3.1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel.....	22
Gambar 3. 2 Peta Lokasi Penelitian.....	23
Gambar 3.3 Desain Reaktor Elektrokoagulasi	32
Gambar 3.4 Desain Reaktor Fotokatalis	33
Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Penelitian	36
Gambar 4.1 Hasil preparasi dan sintesis pasir besi	39
Gambar 4.2 Proses Penggabungan Magnetik dengan TiO_2	40
Gambar 4.3 Hasil Penggabungan Magnetit- TiO_2	40
Gambar 4.4 Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru	41
Gambar 4.5 Kurva Kalibrasi Larutan Metilen Biru	42
Gambar 4.6 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat Arus 10,08 mA/cm^2	43
Gambar 4.7 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat Arus.....	43
Gambar 4.8 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat	44
Gambar 4.9 Spektrum Hasil Fotokatalisis Magnetit- TiO_2 Pada Penyinaran Sinar UV	45
Gambar 4.10 Spektrum Hasil Fotokatalisis Magnetit- TiO_2 Tanpa Penyinaran ...	46
Gambar 4.11 Grafik Hasil Elektrokoagulasi Untuk Variasi Rapat Arus 10,20,dan 30 mA/cm^2	48
Gambar 4.12 Laju Kinetik Elektrokoagulasi Terhadap Waktu Kontak	51
Gambar 4.13 Laju Kinetik Fotokatalis Magnetit- TiO_2 Terhadap Waktu Kontak	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Zat Warna Metilen Biru.....	14
Tabel 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu	17
Tabel 3.1 Alat-alat Penelitian.....	23
Tabel 3.2 Bahan-Bahan Penelitian	28
Tabel 4.1 Nilai Konsentrasi dan Nilai Absorbansi Larutan Metilen Biru Sebagai Larutan Standar.....	41
Tabel 4.2 Nilai Parameter COD dan pH Metilen Biru	47
Tabel 4.3 Hasil Elektrokoagulasi Metilen Biru.....	47
Tabel 4.4 Hasil Degradasi Metilen Biru Untuk Sistem Terintegrasi EC-FC	50



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sektor industri yang sangat pesat saat ini telah menimbulkan berbagai pencemaran lingkungan, salah satunya melalui limbah cair yang mengandung zat warna (Nurhasni dkk., 2018). Zat warna ini menjadi permasalahan utama karena sulit terurai secara alami dan dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan makhluk hidup. Salah satu zat warna yang sering digunakan adalah Metilen Biru (MB), yang banyak dipakai dalam industri tekstil sebagai pewarna thiazine karena harga terjangkau dan mudah diperoleh (Raganata dkk., 2020).

Namun, senyawa MB memiliki struktur benzena yang stabil, beracun, dan bersifat karsinogenik serta mutagenik, sehingga pengelolaan limbah yang mengandung MB sangat diperlukan agar tidak mencemari lingkungan akuatik. Upaya menurunkan kandungan zat warna dalam limbah industri dilakukan dengan berbagai metode, seperti koagulasi, elektrokoagulasi, biodekolorisasi, adsorpsi, klorinasi, dan ozonisasi (Rahayu dkk., 2022). Dalam penelitian ini, diterapkan sistem terintegrasi antara elektrokoagulasi dan fotokatalisis sebagai solusi inovatif untuk mengatasi limbah metilen biru. Integrasi kedua metode ini diharapkan memanfaatkan sinergi antara kemampuan elektrokoagulasi dalam mengendapkan partikel koloid dan fotokatalisis untuk mendekomposisi senyawa organik kompleks, sehingga menghasilkan proses degradasi yang lebih optimal dan efisien.

Elektrokoagulasi merupakan teknik pengolahan limbah cair menggunakan arus listrik dari elektroda untuk membentuk flok-flok kecil yang mengikat partikel berbahaya dalam limbah cair dan memudahkan pemisahannya (Hevira dkk., 2019). Keunggulan metode ini meliputi peralatan yang sederhana, operasi mudah, serta tidak memerlukan bahan kimia tambahan sehingga menghindari masalah netralisasi. Namun, metode ini memiliki keterbatasan, seperti ketidakmampuan mengolah limbah dengan sifat elektrolit tinggi yang dapat menyebabkan hubungan singkat antar elektroda, serta kebutuhan mengganti elektroda secara berkala (Irawan dkk., 2016).

Selain elektrokoagulasi, fotokatalisis juga dapat diterapkan untuk mendegradasi zat warna MB. Fotokatalisis adalah proses kimia yang melibatkan katalis aktif ketika terkena cahaya ultraviolet (UV) atau sinar matahari. Titanium dioksida (TiO_2) menjadi katalis yang paling banyak diteliti dan digunakan karena efisiensinya dalam menguraikan senyawa organik (Tussa'adah & Astuti, 2015). Kelebihan metode fotokatalisis menggunakan TiO_2 adalah kemampuannya untuk mendegradasi senyawa organik serta mereduksi senyawa anorganik menjadi komponen yang lebih sederhana dan aman. Selain itu, metode ini tergolong ekonomis, ramah lingkungan, dan mampu menyerap cahaya pada wilayah sinar ultraviolet (Permatasari dkk., 2015). Namun, metode ini menjadi kurang efektif ketika konsentrasi polutan terlalu tinggi, disebabkan oleh kemampuan adsorpsi fotokatalis yang rendah (Hendarsa dkk., 2013).

Dari sekian banyak bahan semikonduktor, TiO_2 dipilih karena memiliki stabilitas kimia yang sangat baik, tidak mudah terkorosi, tidak mudah teroksidasi, serta tahan terhadap kerusakan akibat bahan kimia yang bersifat agresif. Selain itu, TiO_2 juga memiliki efisiensi fotokatalisis yang tinggi, aman digunakan dan tidak berbahaya, mudah didapatkan, harganya terjangkau, serta memiliki stabilitas fisik yang baik (Rahman dan Sulistyowati, 2023). TiO_2 merupakan katalis yang sangat efisien dalam mendegradasi bahan pewarna MB. Namun, masih ada beberapa kekurangan yang ada, seperti kemampuan penyerapan yang kurang baik disebabkan oleh tingginya rekombinasi pada elektron dan lubang celah pita yang masih tergolong cukup lebar (Gomes dkk, 2019). Untuk meningkatkan kemampuan fotokatalisisnya, TiO_2 harus dipadukan dengan bahan adsorben seperti pasir besi. Pasir besi dipilih karena memiliki karakteristik magnetik yang membantunya dalam mendegradasikan limbah pewarna, termasuk pewarna metilen biru (Syam & Widiyandari, 2014).

Pasir besi adalah jenis pasir yang mengandung kadar besi dalam jumlah yang cukup tinggi. Biasanya, pasir ini memiliki warna gelap, seperti abu-abu tua atau hitam. Dalam endapan pasir besi, terdapat berbagai mineral seperti hematit, magnetit, dan maghemit. Magnetit adalah salah satu mineral yang ada di dalam pasir besi dan terdiri dari unsur besi (Fe) dan oksigen (O_2) dengan rumus kimia Fe_3O_4 . Mineral ini memiliki kemampuan untuk tertarik oleh magnet dan dikenal

sebagai bahan yang bersifat magnetik (Zaman dkk., 2022). Keunggulan dari kombinasi nanopartikel Fe_3O_4 dengan TiO_2 adalah kemampuannya untuk menghambat rekombinasi antara lubang dan elektron selama proses fotokatalisis, sehingga meningkatkan efisiensi kinerja fotokatalis tersebut (Nengsih dkk., 2023).

Berdasarkan penelitian Dilla (2021), perlakuan elektrokoagulasi dan fotokatalisis untuk mendegradasi limbah rumah sakit menggunakan nanokomposit Fe-TiO_2 mampu meningkatkan kemampuan degradasi metilen biru sebesar 98% dan 93% pada voltase $20,25 \text{ mA/cm}^2$. Meskipun teknik elektrokoagulasi dan fotokatalisis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ telah terbukti berhasil menurunkan konsentrasi warna metilen biru secara terpisah, masih ada batasan terkait tingkat efisiensi degradasi ketika kedua metode ini digabungkan, terutama berkenaan dengan variasi kerapatan arus pada proses elektrokoagulasi. Hingga kini, masih sedikit penelitian yang secara khusus mengeksplorasi bagaimana kerapatan arus elektrokoagulasi mempengaruhi efisiensi dari sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dalam menghilangkan MB. Dengan demikian, penelitian ini menjadi sangat penting untuk memahami seberapa besar dampak variasi kerapatan arus terhadap efisiensi degradasi, sehingga dapat ditemukan kondisi operasi yang terbaik dan memiliki potensi untuk diterapkan sebagai solusi yang lebih efektif dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair zat warna di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Berapa kerapatan arus optimal yang menghasilkan degradasi tertinggi dalam sistem elektrokoagulasi?
2. Bagaimana kemampuan fotodegradasi metilen biru pada sistem terintegrasi elektrokoagulasi–fotodegradasi menggunakan fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$?
3. Bagaimana pengaruh waktu kontak dalam fotodegradasi sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui kemampuan fotodegradasi metilen biru pada sistem terintegrasi elektrokoagulasi–fotodegradasi menggunakan fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$.
2. Untuk mengetahui berapa kerapatan arus optimal yang menghasilkan degradasi tertinggi dalam sistem elektrokoagulasi.
3. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh waktu kontak dalam degradasi sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotodegradasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang hendak diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut: sebagai berikut:

1. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh kerapatan arus terhadap efisiensi degradasi zat warna metilen biru dalam sistem terintegrasi elektrokoagulasi dan fotokatalisis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$. Peneliti dapat memperoleh pengalaman praktis dalam pengoperasian alat elektrokoagulasi dan fotokatalisis, serta analisis data degradasi zat warna menggunakan metode spektrofotometer.
2. Penelitian ini dapat memperkaya khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang teknik lingkungan, khususnya dalam pengolahan limbah cair menggunakan teknologi elektrokoagulasi dan fotokatalisis. Hasil penelitian dapat dijadikan referensi akademik bagi mahasiswa dan dosen dalam pengembangan riset lanjutan.

1.5 Batasan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka batasan-batasan dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian ini membatasi variasi kerapatan arus listrik yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi pada nilai $10,08 \text{ mA/cm}^2$, $20,25 \text{ mA/cm}^2$, dan $30,41 \text{ mA/cm}^2$ untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi degradasi zat warna MB.
2. Konsentrasi zat warna MB yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada nilai 20 ppm, serta waktu kontak elektrokoagulasi dibatasi pada 30 menit, dan 60 menit, serta waktu penyinaran menggunakan sinar UV

divariasikan pada interval 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit untuk mengamati pengaruh waktu penyinaran terhadap proses fotokatalisis dalam sistem terintegrasi.

3. Penelitian ini hanya menggunakan jenis plat elektroda alumunium dengan ukuran 10 x 20 cm dan parameter yang diukur hanya *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Potential of Hydrogen* (pH), serapan optik dan konsentrasi metilen biru yang tertinggal menggunakan spektrofotometer UV-Vis.
4. Pasir besi yang menjadi bahan dalam penelitian ini diperoleh dari Pantai Anoi Itam yang terletak di Kota Sabang, Aceh.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Elektrokoagulasi

2.1.1 Definisi Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi merupakan metode untuk mengolah air atau limbah cair dengan memanfaatkan aliran listrik yang diarahkan ke elektroda guna menghapus pencemar seperti partikel yang terjebak, logam berat, organisme mikro, dan zat pewarna tanpa perlu menambahkan bahan kimia koagulan yang biasa digunakan. Metode pengolahan elektrokoagulasi telah terbukti berhasil dalam mendegradasi level *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Total Suspended Solid* (TSS) karena proses ini memanfaatkan listrik untuk memicu reaksi kimia di dalam air, yang menghasilkan ion logam dari elektroda yang bertindak sebagai koagulan. Ion logam yang terbentuk kemudian berinteraksi dengan koloid serta partikel terlarut di dalam air, menciptakan flok yang lebih besar sehingga lebih mudah untuk diambil terpisah (Cahyani dan Rosariawari, 2025).

Elektrokoagulasi adalah cara pengolahan yang dapat digunakan untuk berbagai jenis limbah air dan telah digunakan secara luas untuk menghapus pencemar baik yang bersifat organik maupun anorganik. Proses elektrokoagulasi pertama kali diterapkan di Inggris pada tahun 1889. Patentan untuk elektrokoagulasi dalam pengolahan mineral diberikan kepada Elmore pada tahun 1904, sementara elektrokoagulasi menggunakan Aluminium (Al) dan Besi (Fe) sebagai elektroda dipatenkan di Amerika Serikat pada tahun 1909 (Nugroho dkk., 2024).

2.1.2 Mekanisme Elektrokoagulasi

Terdapat tiga tahapan utama dalam mekanisme elektrokoagulasi, yaitu pertama proses oksidasi di anoda yang menghasilkan koagulan aktif. Selanjutnya, koagulan tersebut mengganggu kestabilan partikel koloid dan memecah emulsi dalam larutan. Akhirnya, partikel koloid yang kehilangan kestabilannya akan saling bergabung membentuk flok. Mekanisme yang menyebabkan destabilisasi partikel koloid dan pemecahan emulsi adalah sebagai berikut (Daulay, 2021):

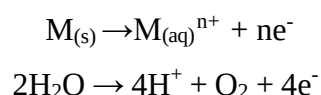
1. Kompresi dari difusi lapisan ganda di sekitar spesies yang bermuatan terjadi oleh interaksi ion yang dihasilkan dari proses oksidasi pada *sacrificial anode*.
2. Penghapusan ion pencemar dalam air dengan memanfaatkan ion yang bertentangan yang dihasilkan oleh anoda pengorbanan. Ion yang bertentangan itu bisa memperkuat gaya tarik van der Waals dengan ion pencemar, sehingga memicu proses penggumpalan.
3. Proses elektrokoagulasi menghasilkan pembentukan flok yang menyebabkan terbentuknya *sludge*, terdiri dari partikel yang terjebak dalam proses pengendapan dan partikel koloid yang masih ada di dalam air.

Pada dasarnya, dalam teknik elektrokoagulasi terdapat sebuah wadah untuk menempatkan dua tipe elektroda, di mana salah satu elektroda berperan sebagai anoda dan yang lainnya sebagai katoda. Kedua elektroda tersebut dihubungkan ke sumber daya listrik dan dicelupkan ke dalam air yang akan diproses, atau yang dikenal sebagai *elektrolyte*. Listrik mengalir dari sumbernya (misalnya pemasok daya) ke dalam sel melalui elektroda yang bisa terbuat dari bahan yang serupa atau berbeda, seperti Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe, dan Fe-Al (Nugroho dkk., 2024).

Berikut adalah reaksi-reaksi yang terjadi pada proses elektrokoagulasi yaitu (Daulay, 2021):

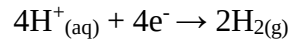
1. Reaksi di Anoda

Reaksi yang terjadi di anoda adalah reaksi oksidasi di mana logam dari elektroda anoda mengalami oksidasi menjadi ion logam bermuatan positif. Ion logam ini kemudian larut ke dalam larutan dan berperan sebagai koagulan yang akan membantu mengendapkan partikel-partikel kotoran dan polutan dalam air limbah. Reaksi yang terjadi di anoda adalah sebagai berikut :

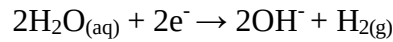


2. Reaksi di katoda

Ion H^{+} yang berasal dari senyawa asam akan direduksi menjadi suatu gas yang bebas dengan bentuk gelembung-gelembung gas. Berikut ini adalah persamaan reaksinya:



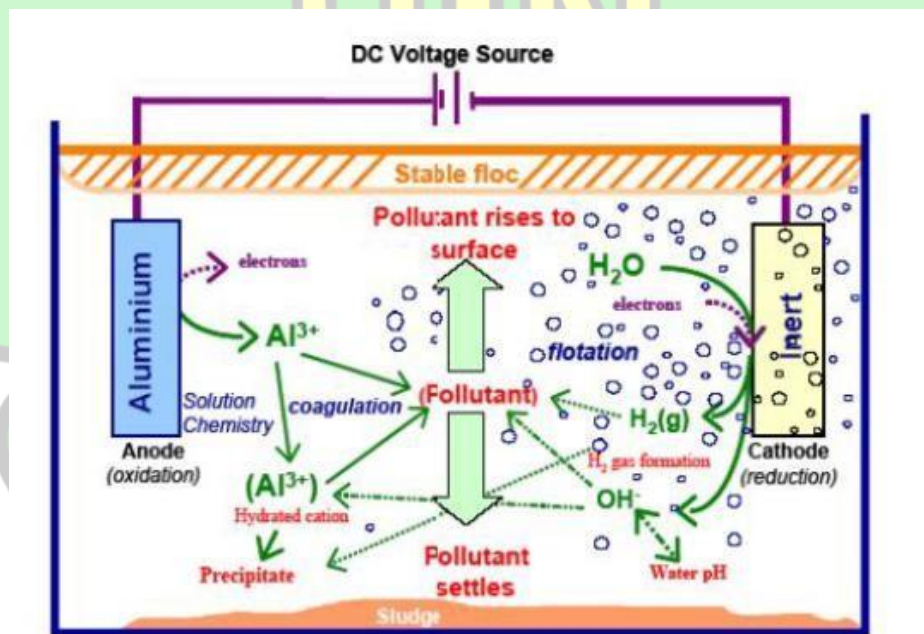
Air sebagai pelarut mengalami reaksi reduksi yang menghasilkan gas hidrogen (H_2) pada katoda. Berikut ini persamaan reaksinya:



pada anoda aluminium terjadi reaksi oksidasi aluminium menghasilkan ion Al^{3+} . Rapat arus anoda (IA) merupakan laju reaksi oksidasi Al menjadi Al^{3+} yang terjadi pada permukaan anoda dengan luas tertentu. Sementara itu pada katoda reaksi yang terjadi adalah $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$. Secara fisik rapat arus katoda diartikan laju pembentukan gas H_2 yang terjadi pada permukaan katoda dengan luas tertentu (Yusbarina & Buchari, 2014).

Berikut mekanisme proses elektrokoagulasi yang dapat dilihat pada Gambar

2.1



Gambar 2.1 Mekanisme Proses Elektrokoagulasi
Sumber: Fathoni (2015)

2.1.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi memiliki beberapa faktor yang mempengaruhi antara lain (Elia dan Widayatno, 2020) :

1. Jenis Elektroda

Jenis elektroda bisa dipahami sebagai lokasi di mana reaksi elektrokimia berlangsung selama proses elektrokoagulasi. Pemilihan elektroda ditentukan oleh jenis polutan yang ingin dihilangkan dan karakteristik kimia

dalam larutan elektrolit. Semakin cocok antara jenis elektroda dan polutan yang dibuang serta elektrolit yang dipakai, maka semakin tinggi efisiensi pengurangan polutan dalam proses elektrokoagulasi.

2. pH larutan

Dalam proses elektrokoagulasi, terjadilah elektrolisis air yang menghasilkan gas hidrogen serta ion hidroksida. Dengan bertambahnya lama waktu kontak yang diterapkan, pembentukan gas hidrogen dan ion hidroksida juga akan semakin cepat. Jika jumlah ion hidroksida yang dihasilkan meningkat, maka pH dalam larutan juga akan naik.

3. Kerapatan arus

Kenaikan kerapatan arus akan mempercepat proses pembentukan flok oleh ion yang bermuatan. Besarnya aliran listrik yang mengalir sebanding dengan jumlah material yang dihasilkan selama proses tersebut.

4. Ketebalan plat

Reaksi antara oksidasi dan reduksi yang terjadi sangat tergantung pada tebal atau tipisnya plat.

5. Jarak elektroda

Penghalang dipengaruhi oleh jarak antar elektroda dan lebih menguntungkan untuk penggunaan arus, karena semakin jauh jarak elektroda, arus yang mengalir akan semakin kecil.

6. Kecepatan pengadukan

Meningkatkan kecepatan pengadukan hingga mencapai level optimal akan memperbaiki efektivitas pengurangan polutan, sebab pergerakan ion-ion yang terbentuk menjadi lebih cepat. Tetapi, jika pengadukan melebihi kecepatan optimum, efisiensi akan menurun akibat tumbukan flok yang lebih kuat sehingga menyebabkan kerusakan satu sama lain.

2.1.4 Kerapatan Arus Elektrokoagulasi

Pengaturan kepadatan arus memiliki peranan yang krusial dalam proses elektrokoagulasi. Kepadatan arus berpengaruh besar terhadap laju elektrolisis logam anoda serta pembentukan gelembung secara elektrolitik (Yusbarina, 2014). Rapat arus (I) diartikan sebagai arus (i) yang mengalir melalui elektroda dengan luas (s) di permukaannya. Jika ukuran arus diukur dalam ampere dan luas

permukaan elektroda dalam cm^{-2} , maka ukuran rapat arus menjadi ampere/cm^2 . Karena proses elektrolisis dapat terjadi di anoda dan katoda, maka rapat arus juga dikelompokkan menjadi rapat arus anoda dan rapat arus katoda.

Dengan peningkatan arus listrik, efisiensi proses juga mengalami peningkatan. Pada tegangan yang lebih tinggi, flok yang terbentuk memiliki ukuran dan kecepatan pertumbuhan yang lebih besar, sehingga proses elektrokoagulasi menjadi lebih efektif (Yusbarina, 2014).

2.2 Fotokatalisis

Istilah fotokatalisis berasal dari penggabungan kata foto dan katalisis, yang berarti sebuah proses reaksi fotokimia gabungan yang membutuhkan cahaya dan katalis untuk mempercepat berlangsungnya dua transformasi kimia (Mahreni dkk., 2021). Perubahan tersebut berlangsung di permukaan katalis yang dikenal dengan sebutan fotokatalis.

Fotokatalisis adalah metode yang sangat efektif untuk membersihkan limbah cair, limbah industri, serta lingkungan secara keseluruhan. Dengan melakukan modifikasi dan pengembangan lebih lanjut terhadap teknologi ini, kita dapat menurunkan tingkat polusi di udara maupun air (Setiawan dkk., 2024). Fotokatalisis merupakan suatu proses yang menggabungkan fotoreaksi dengan penggunaan katalis, di mana katalis berfungsi untuk mempercepat fotoreaksi. Katalis itu sendiri adalah suatu bahan yang dapat mempercepat kecepatan reaksi tanpa ikut habis dalam perjalanan reaksi tersebut, oleh karena itu, proses ini dapat menurunkan energi aktivasi dari zat yang terlibat (Safaat, 2020).

Metode degradasi fotokatalisis memiliki sejumlah keunggulan, antara lain mampu mendekomposisi kontaminan organik secara cepat dan menyeluruh, menurunkan tingkat toksisitas logam berat, memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi, serta dapat dijalankan pada suhu dan tekanan rendah sehingga prosesnya bersifat ramah lingkungan (Sucahya dkk., 2016).

Dua jenis fotokatalisis dapat dibedakan berdasarkan jenis katalis yang digunakan, yaitu (Sari, 2019):

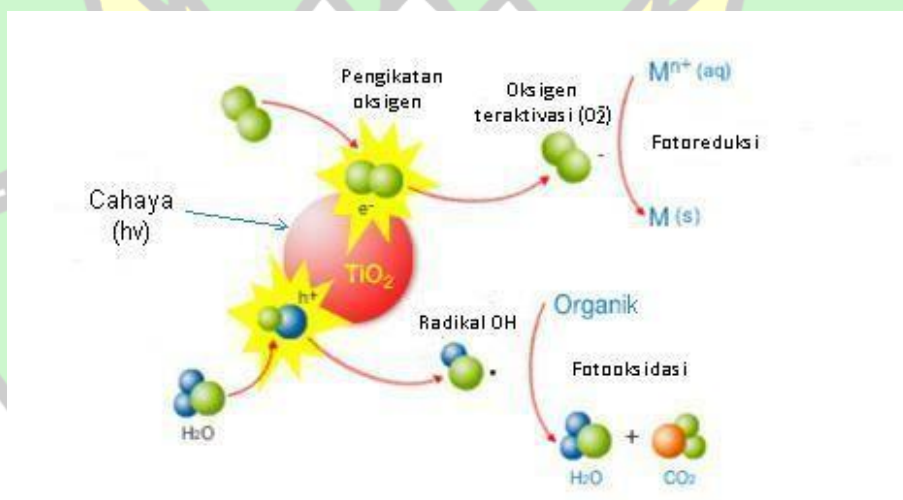
1. Fotokatalisis Homogen

Katalis yang umumnya berupa besi, dicampurkan ke dalam air yang mengandung limbah yang akan diproses. Sebagian besar proses fotokatalisis homogen yang dikenal adalah reaksi *photo-fenton*.

2. Fotokatalisis Heterogen

Dalam fotokatalisis heterogen, jenis katalis yang efektif digunakan dalam proses fotokatalisis adalah semikonduktor seperti TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , CeO_2 , CdS , dan ZnS , yang membentuk dispersi saat terkena penyinaran untuk menginisiasi reaksi pada antarmuka padat-cair atau padat-gas.

Tahapan fotokatalisis melibatkan beberapa proses, seperti penyerapan cahaya oleh bahan semikonduktor yang menghasilkan elektron dan lubang, reaksi redoks, penghapusan zat pengotor, serta penyerapan bahan reaktan (Said, 2021). Berikut merupakan skema dari proses fotokatalis yang di tunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema dari Proses Fotokatalisis
Sumber: tekim.iti.ac.id

2.3 Fotodegradasi

Salah satu metode lain untuk mengelola limbah adalah dengan menerapkan dasar fotodegradasi (Riskiani dkk., 2019). Fotodegradasi adalah proses di mana senyawa organik diuraikan menjadi senyawa yang lebih ramah lingkungan dengan menggunakan energi dari foton (Wardhani dkk., 2016). Fotodegradasi memanfaatkan energi dari cahaya (baik sinar matahari maupun lampu UV) untuk

memicu katalisis di permukaan bahan semikonduktor, yang akan menciptakan radikal hidroksil (-OH) yang berfungsi untuk menguraikan polutan organik dan pewarna (Riskiani dkk., 2019).

Salah satu elemen yang mempengaruhi potensi fotokatalisis dalam mendegradasi adalah proses adsorpsi. Proses ini terjadi karena dalam tahapan fotodegradasi, terlebih dahulu zat warna akan melekat pada permukaan partikel fotokatalisis dan diikuti oleh proses oksidasi fotokatalisis (Diantariani dan Santi, 2016).

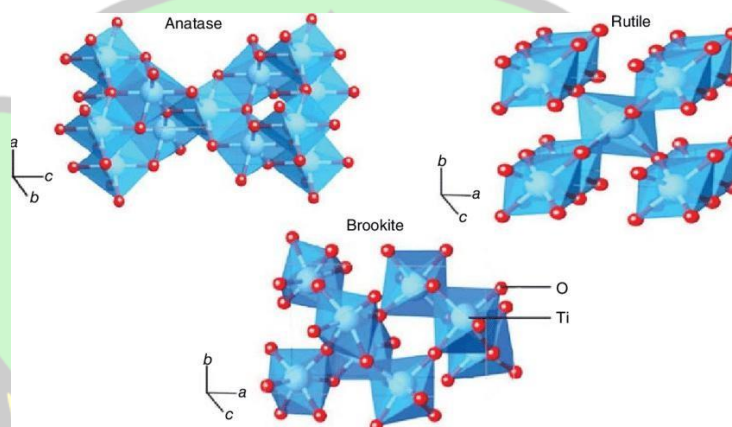
2.4 Titanium Dioksida (TiO₂)

Titanium dioksida (TiO₂) adalah senyawa anorganik yang banyak digunakan, terutama sebagai pigmen putih berkualitas tinggi. Selain itu, TiO₂ juga berfungsi sebagai *filler* dalam industri kertas, plastik, dan karet, serta digunakan sebagai *fluks* dalam industri kaca. Sebagian besar konsumsi TiO₂ difokuskan pada industri pigmen, sementara hanya sekitar 6% dari total TiO₂ yang diolah lebih lanjut menjadi logam titanium (Indrawati dkk., 2013).

Titanium dioksida (TiO₂) adalah material yang memiliki banyak keunggulan, antara lain sifat optik yang unggul, tidak beracun, serta aktivitas fotokatal yang tinggi. Selain itu, TiO₂ memiliki harga yang terjangkau dan kelimpahan yang melimpah di alam. Material ini tidak larut dalam air dan termasuk semikonduktor dengan celah pita (*band gap*) yang lebar. TiO₂ juga memiliki luas permukaan yang besar, ramah lingkungan, serta stabil secara mekanik, termal, dan kimia. Selain itu, TiO₂ menunjukkan sifat dielektrik yang baik dan biokompatibilitas, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi industri dan medis (Rahman dkk., 2014).

Titanium dioksida (TiO₂) secara alami terdapat dalam tiga fase kristal utama, yaitu *rutile*, *anatase*, dan *brookite*. Fase *rutile* adalah yang paling umum dan biasanya diperoleh dari mineral ilmenit melalui metode *becher*, di mana oksida besi dalam *ilmenit* dipisahkan pada suhu tinggi menggunakan gas sulfat atau klor, sehingga menghasilkan TiO₂ *rutile* dengan kemurnian sekitar 91-93%. Fase *anatase* lebih stabil pada partikel yang berukuran kurang dari 11 nm, fase *brookite* stabil pada ukuran antara 11 sampai 35 nm, sementara fase *rutile* stabil pada partikel

berukuran lebih dari 35 nm (Hastuti, 2012). Dapat dilihat bentuk kristal TiO_2 pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bentuk Kristal TiO_2
 Sumber: Karthick dkk, (2019)

Dari ketiga bentuk tersebut, *rutile* dan *anatase* berperan paling penting dalam proses fotokatalisis di lingkungan alami., sementara *brookite* jarang ditemukan karena kestabilannya yang rendah. *Anatase* dan *rutile* berbeda dalam hal massa jenis, yaitu *anatase* memiliki massa jenis sekitar 3,9 g/mL, sedangkan *rutile* sekitar 4,2 g/mL. TiO_2 digunakan di berbagai sektor industri sebagai pigmen, adsorben, katalis pendukung, dan semikonduktor. Senyawa ini banyak dipakai karena menawarkan berbagai kelebihan, seperti sifat non-toksik, stabilitas tinggi, tidak korosif, tidak larut dalam air, serta ramah terhadap lingkungan (Priatmoko dan Wahyuni, 2021).

Penelitian fotokatalis ini menggunakan TiO_2 dengan struktur *anatase* karena tipe ini menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam proses degradasi polutan dengan bantuan sinar UV, serta memiliki aktivitas fotokatalisis yang cukup tinggi dibandingkan dengan struktur *rutile*. Hal tersebut terjadi dikarenakan *anatase* memiliki permukaan yang lebih besar daripada *rutile*. Di sisi lain, struktur *brookite* kurang stabil dan sulit untuk dibuat, sehingga penggunaannya dalam berbagai aplikasi sangat terbatas.

2.5 Magnetit Fe₃O₄

Magnetit memiliki rumus kimia untuk Fe₃O₄. Magnetit adalah suatu dari senyawa-senyawa besi oksida tersebut. Senyawa ini ternyata mempunyai nilai ekonomis yang tinggi. Partikel nano Fe₃O₄ adalah material yang banyak dikembangkan karena memiliki potensi aplikasi besar di bidang farmasi, biomedis, alutsista, serta lain-lain (Adhim, 2018).

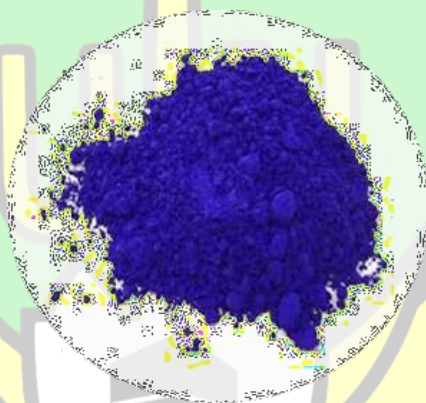
Magnetit, yang juga dikenal dengan sebutan *black iron oxide*, *magnetic iron ore*, *loadstone*, *ferrous ferrit*, atau *hercules stone*, merupakan oksida logam transisi dengan tingkat kemagnetan terkuat di antara yang lain.. Para peneliti sudah melakukan banyak metode untuk pembuatan Fe₃O₄ yang halus juga homogen. Metode tersebut antara lain metode *kopresipitasi*, *solvothermal*, *sol gel*, *solid state*, serta lain-lain (Maylani dkk., 2016). Metode ko-presipitasi dimanfaatkan dalam pembuatan nanopartikel magnetit karena teknik ini sederhana, tidak membutuhkan temperatur yang tinggi, dan biaya riset yang lebih terjangkau (Nengsih dkk., 2023).

Magnetit memiliki sifat istimewa karena merupakan bahan ferimagnetik dan mampu menghantarkan listrik seperti logam pada umumnya, sehingga dapat berinteraksi secara kuat dengan medan magnet dan listrik. Struktur spinel yang dimiliki magnetit menunjukkan bahwa atom oksigen yang lebih besar menyusun bentuk kubus, sementara atom Fe yang lebih kecil berada pada posisi *tetrahedral* dan *oktahedral*. Pada posisi *tetrahedral*, atom Fe dikelilingi oleh 4 atom oksigen, sedangkan pada posisi *oktahedral*, atom Fe dikelilingi oleh 6 atom oksigen (Adhim, 2018).

Magnetit (Fe₃O₄) telah banyak digunakan untuk membentuk komposit dengan partikel TiO₂ karena memiliki sifat magnetik yang kuat, tingkat toksisitas yang rendah, serta biokompatibilitas yang baik dalam jaringan hidup. Selain itu, nanopartikel Fe₃O₄ memiliki pita energi yang relatif kecil, kurang dari 3 eV, sehingga memungkinkan penggunaannya dalam proses fotokatalisis. Keunggulan lain dari kombinasi nanopartikel Fe₃O₄ dengan TiO₂ adalah kemampuannya untuk menghambat rekombinasi antara lubang dan elektron selama proses fotokatalisis, sehingga meningkatkan efisiensi kinerja fotokatalis tersebut (Nengsih dkk., 2023).

2.6 Zat Warna Metilen Biru (MB)

Metilen Biru (MB) adalah pewarna yang banyak digunakan dalam sektor tekstil dan senyawa ini mempunyai struktur benzena yang membuatnya sulit untuk terdegradasi secara alami (Rahayu dkk., 2022). Paparan akut metilen biru dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti peningkatan denyut jantung, muntah, syok, terbentuknya *heinz body*, sianosis, penyakit kuning (*jaundice*), kelumpuhan keempat anggota gerak (*quadriplegia*), serta nekrosis jaringan pada manusia. Beberapa dampak tersebut menjadi alasan utama mengapa penghilangan metilen biru dari perairan sangat diperlukan (Maryudi dkk., 2021). Dapat dilihat bentuk serbuk zat warna metilen biru pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 Serbuk Zat Warna Metilen Biru
Sumber: unair.ac.id

Sesuai dengan penjelasan yang ada dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair, disebutkan bahwa konsentrasi maksimum metilen biru dalam limbah cair tidak boleh melebihi 10 mg/l. Dengan Demikian, pengolahan limbah pewarna Metilen Biru (MB) sangat diperlukan untuk menurunkan konsentrasinya di lingkungan. Banyak pewarna memiliki struktur molekul aromatik yang sangat stabil dan ukuran molekul yang besar, sehingga sulit untuk diolah secara biologis. Karakteristik zat warna MB ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik zat warna metilen biru

Nama umum	Metilen biru (<i>Methylene blue</i>)
Rumus empiris	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Nomor C.I.	52015
Nama C.I.	<i>Basic blue 9, Fenotiaziniumklorida, Metil violet</i>
Kelas	<i>Thiazine kationik (heterosiklik aromatik)</i>

Warna	Serbuk berwarna hijau tua yang ketika dilarutkan dalam air akan membentuk larutan berwarna biru tua.
Sifat	Merupakan zat warna yang bersifat basa, dapat mengikat jaringan biologis,
Ph	2-6 (jika berada di air 10g/L)
Massa molar (berat molekul)	319.85 g/mol
Titik leleh	180°C
Titik lebur	100-110°C (dengan dekomposisi)
Titik didih	Terdekomposisi. Kecuali dinyatakan lain, data diatas berlaku pada temperatur dan tekanan standar (25 °C/ 77 °K), 100 kP

Sumber: Azizah, 2018

Ambang batas kualitas limbah cair dari industri tekstil yang diatur oleh pemerintah dan diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Baku Mutu Limbah Cair Industri Tekstil

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton)
BODs	60	6
COD	150	15
TSS	50	5
Fenol	0,5	0,05
Krom	1,0	0,1
Amonia Total (NH ₃ -N)	8,0	0,8
Sulfida	0,3	0,03
Minyak dan Lemak	3,0	0,3
pH	6,0-9,0	
Debit Limbah Paling Tinggi	100 m ³ /ton produk tekstil	

Sumber: Permen LH No. 5 Tahun 2014

2.7 Spektrofotometri UV-Vis

Spektrofotometer merupakan alat yang umum digunakan untuk analisis bahan kimia baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Spektrofotometri adalah metode pengukuran kuantitatif yang didasarkan pada analisis penyerapan radiasi elektromagnetik, yang berguna untuk mengkaji spektrum cahaya atau panjang gelombang cahaya yang diukur, dan hasilnya dapat dinyatakan dalam nilai absorbansi dan transmisi (Chakraborty dkk., 2018).

Prinsip utama spektrofotometri UV-Vis adalah interaksi antara energi sinar monokromatis dengan molekul dalam materi. Energi yang diserap memiliki nilai tertentu sehingga membuat elektron berpindah dari kondisi dasar ke keadaan

terekситasi dengan energi lebih tinggi. Penyerapan ini tidak langsung terjadi di wilayah ultraviolet untuk semua struktur elektronik, melainkan hanya terjadi pada sistem terkonjugasi dan struktur elektronik yang memiliki ikatan p serta elektron *non-bonding* (Chakraborty dkk., 2018).

Spektrum UV-Vis sebaiknya diambil dari larutan yang terlarut. Ketika cahaya putih atau radiasi melalui larutan berwarna, radiasi dengan panjang gelombang tertentu akan diserap (absorpsi) berdasarkan seberapa kuat elektron yang terikat dalam molekul tersebut (Padmaningrum dan Marwati, 2015).

Secara umum, ada dua jenis alat spektrofotometer, yaitu *single-beam* dan *double-beam*.

a. *Single-beam*

Instrumen *single-beam* dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dengan mengukur absorbansi pada satu panjang gelombang saja. Instrumen ini memiliki keunggulan seperti desain yang sederhana, biaya yang lebih terjangkau, serta mampu mengurangi pengeluaran secara signifikan. (Suharti, 2019)

b. *Double-beam*

Instrumen *double-beam* memiliki dua berkas sinar yang dibentuk oleh cermin berbentuk V, yang disebut pemecah sinar. Berkas pertama melewati larutan blanko, sementara berkas kedua secara bersamaan melewati sampel. (Suharti, 2019). Lampu *deuterium* digunakan sebagai sumber sinar polikromatis untuk UV, sedangkan lampu *wolfram* digunakan untuk sinar tampak atau visibel.

2.8 Metode Kopresipitasi

Metode kopresipitasi digunakan untuk mengendapkan beberapa kation sekaligus dengan cara presipitasi pada kondisi supersaturasi. Kondisi supersaturasi ini umumnya diperoleh melalui penguapan secara fisik atau perubahan pH secara kimia (Taurina dkk., 2023).

Metode kopresipitasi merupakan teknik yang sangat efektif karena dapat diterapkan dalam kondisi lingkungan yang normal. Pada proses sintesisnya, teknik ini mengandalkan reaksi antara asam dan basa, di mana asam berfungsi sebagai pelarut, sedangkan basa membantu mengendapkan zat terlarut sehingga

membentuk presipitasi yang diinginkan. Sintesis nanomagnetik dengan metode ini diharapkan mampu menghasilkan partikel dengan sifat monodispersif, yaitu partikel yang tersebar secara merata dan homogen. (Tussa'adah dan Astuti, 2015).

2.9 Penelitian Terdahulu

Sejumlah studi mengenai fotodegradasi limbah zat warna metilen biru telah dilaksanakan, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hasil Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Metode/Fokus Penelitian	Hasil
1	Dilla D,S (2021), Kombinasi Elektrokoagulasi dan Fotokatalisis untuk Degradasi Limbah Rumah Sakit Serta Produksi Hidrogen Secara Simultan Menggunakan Nanokomposit Fe-TiO ₂ .	Sistem kombinasi elektrokoagulasi yang ditambahkan fotokatalisis dalam mendegradasi limbah metilen biru dan antibiotik siprofloksasin secara simultan dilakukan dengan melihat efek dopan Fe dalam nanopartikel TiO ₂ .	Sistem kombinasi elektrokoagulasi dengan fotokatalisis mampu meningkatkan kemampuan degradasi metilen biru serta siprofloksasin sebesar 98% dan 93% pada voltase 20 V dengan produksi hidrogen sebesar 0,98 mmol. Untuk voltase 50 V. Sistem kombinasi mampu mendegradasi metilen biru sebesar 97,6% dan 60% untuk siprofloksasin.
2	Sulistyaningsih A (2020), Peningkatan Efektivitas Elektrokoagulasi dan Fotokatalis pada Proses Degradasi Limbah Batik	Mengetahui efisiensi pengolahan limbah batik dengan metode kombinasi penambahan elektrolit dan AOP pada	Variabel terbaik dari proses <i>batch</i> Efisiensi persentase penurunan COD, TSS, warna, TDS, dan pH pada

		proses elektrokoagulasi dan fotokatalis berdasarkan rapat arus, konsentrasi elektrolit dan konsentrasi H_2O_2 .	limbah menggunakan kombinasi elektrokoagulasi dan fotokatalis masing-masing sebesar 87,8%, 84,01%, 94,07%, 32,9%, dan pH 7,3 pada waktu kontak 120 menit.
3	Pelawi L,F (2020), Kombinasi proses Elektrokoagulasi dan Fotokatalisis untuk Deklorisasi Pewarna <i>Tartrazine</i> dan Produksi Hidrogen Secara Simultan Menggunakan Komposit $CuO TiO_2 Nanotubes$	Dilakukan kombinasi elektrokoagulasi dan fotokatalisis dan melihat efek dopan CuO dalam $TiO_2 nanotubes$ untuk mendokolorisasi limbah pewarna dan sekaligus menghasilkan H_2 .	Mengkombinasikan sistem fotokatalisis pada sistem elektrokoagulasi dapat meningkatkan kemampuan dekolorisasi <i>tartrazin</i> sebesar 20,8% pada voltase 20 V dan 11,7% pada voltase 50 V. Kenaikan voltase pada sistem elektrokoagulasi-fotokatalisis dapat meningkatkan laju dekolorisasi sehingga dapat mencapai baku mutu dalam waktu yang lebih singkat, serta meningkatkan produksi H_2 sebesar 84,7% pada sistem kombinasi pada voltase 20 V

4	Kurniawan R (2018) Degradasi Zat Warna <i>Tartrazine</i> dan Produksi Hidrogen Secara Simultan dengan Kombinasi Fotokatalisis-Elektrokoagulasi	Proses fotokatalisis dilakukan dengan menggunakan katalis TiO_2 <i>nanotube</i> yang telah disintesis dengan metode anodisasi. Pada proses elektrokoagulasi digunakan AI-SS 316 dengan variasi tegangan 5V: 10V: 25V.	Elektrokoagulasi secara teknis dapat digunakan sebagai metode degradasi zat warna <i>tartrazine</i> karena mampu mendegradasi zat warna sebesar 82,45%. TiO_2 <i>nanotube</i> hasil preparasi dapat mendegradasi dengan baik zat warna <i>tartrazine</i> secara fotokatalisis dengan persen degradasi sebesar 48,86% pada waktu 240 menit. Dari hasil penelitian sistem kombinasi fotokatalisis-elektrokoagulasi didapatkan degradasi zat warna <i>tartrazine</i> sebesar 90,68% dan konsentrasi gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan dari kombinasi fotokatalisis-elektrokoagulasi sebesar 17,07%.
---	--	--	--

5	Octavianty A,R (2023), Penurunan Kadar Pencemar Pada Air Limbah Penatu Menggunakan Metode Elektrokoagulasi	Menganalisis kemampuan metode elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda Alumunium dengan ukuran 10cm x 20cm dengan jarak elektroda 5cm pada efektivitas penurunan parameter pencemar serta pengaruh variasi tegangan dan waktu kontak terhadap penurunan nilai COD, TSS dan penyesuaian terhadap nilai pH dalam air limbah penatu pada proses elektrokoagulasi.	Tegangan dan lama waktu kontak dapat mempengaruhi efektivitas penurunan bahan pencemar dengan proses elektrokoagulasi. Tegangan dan waktu kontak yang cukup tinggi dapat meningkatkan efektivitas penurunan bahan pencemar air limbah penatu. Efektivitas pengolahan memperoleh nilai terbaik pada tegangan 5V dan waktu kontak 120 menit dengan efektivitas penurunan pada COD 93,72 % dan TSS 90,38% .
---	--	---	--

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif, dengan menerapkan metode eksperimen yang dilakukan secara langsung di laboratorium. Limbah dari zat warna Metilen Biru (MB) dijadikan sampel dalam penelitian ini untuk mengeksplorasi proses degradasi dengan mengombinasikan dua metode, yaitu elektrokoagulasi dan fotokatalisis. Dalam penelitian ini, pasir besi yang diperoleh langsung dari Pantai Anoi Itam, Sabang, juga digunakan. Pasir besi tersebut diolah menjadi magnetit dengan metode kopresipitasi. Setelah menjadi magnetit (Fe_3O_4) dan dicampurkan dengan Titanium Dioksida (TiO_2) sebagai katalis, yang kemudian akan menjalani proses fotodegradasi.

Dalam penelitian ini terdapat beberapa langkah yang diawali dengan penentuan masalah yang akan diteliti. Kemudian dilanjutkan dengan kajian literatur untuk menyelesaikan isu tersebut dengan mencari penelitian-penelitian terdahulu dan menggunakannya sebagai bahan rujukan. Dalam penelitian yang dilakukan, peneliti harus memiliki pemahaman yang mendalam mengenai objek yang menjadi fokus penelitian. Tahap berikutnya adalah menyiapkan larutan metilen biru dengan konsentrasi 20 ppm, lalu melanjutkan dengan persiapan pasir besi dan sintesis magnetit dari pasir besi. Pada tahap ini, pasir besi dipisahkan dari zat pengotornya dan selanjutnya diolah menjadi magnetit yang kemudian dicampur dengan TiO_2 sebagai katalis. Selanjutnya, melakukan riset dan pengujian sampel. Langkah terakhir adalah melakukan analisis data untuk memahami informasi yang didapat selama penelitian dan mendapatkan hasil serta kesimpulan bagi semua rumusan masalah yang ada dalam penelitian ini.

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

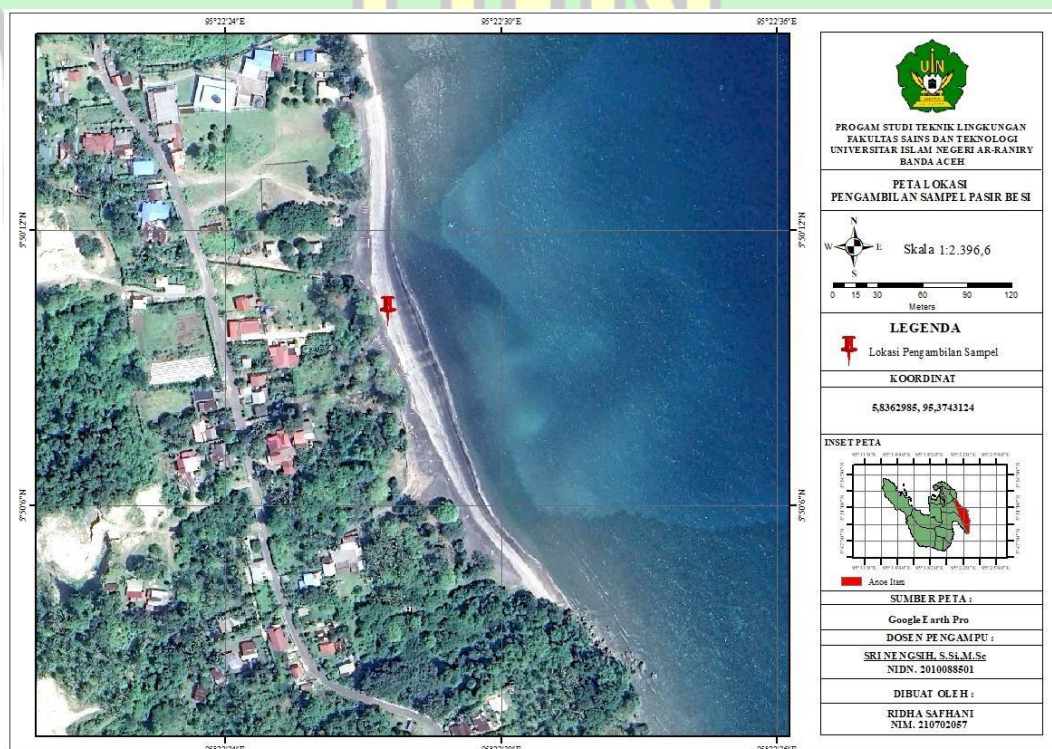
3.2.1 Waktu Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini diperkirakan berlangsung selama ± 3 bulan, yang dimulai dari September 2025 – November 2025. Prosesnya dimulai dengan persiapan alat elektrokoagulasi hingga akhirnya menghasilkan kesimpulan dan analisis data.

3.2.2 Lokasi Penelitian

a. Lokasi Pengambilan Sampel Pasir Besi

Berdasarkan penelitian terdahulu dari Purnawan dkk., 2018, pasir besi dari Pantai Anoi Itam, Kota Sabang, Aceh dengan koordinat 5,83 LU dan 95,37° BT mengandung persentase magnetit (Fe_3O_4) yang sangat tinggi dibanding daerah lain. Oleh karena itu, sampel yang digunakan dalam proses fotokatalis adalah magnetit (Fe_3O_4) akan diambil dari Pantai Anoi Itam. Peta lokasi di mana sampel diambil bisa dilihat pada Gambar 3.1.

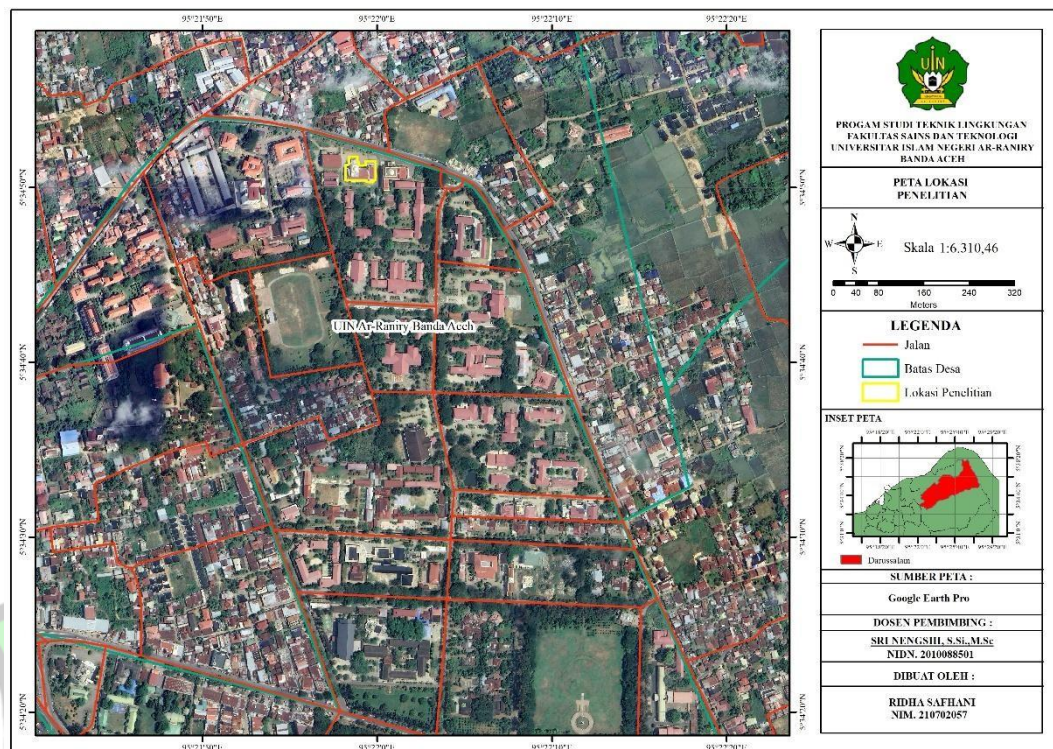


Gambar 3.1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel

b. Lokasi Penelitian

Penelitian degradasi zat warna metilen biru dengan menggunakan metode elektrokoagulasi dan fotokatalisis dengan penambahan magnetit yang dicampur dengan TiO_2 akan dilakukan di Laboratorium Multifungsi Universitas Islami

Negeri Ar-Raniry, Jl. Lingkar Kampus, Rukoh, Kec. Syiah Kuala, Kota Banda Aceh.



Gambar 3. 2 Peta Lokasi Penelitian

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alat-alat Penelitian

Nama	Gambar	Keterangan
Gelas <i>beaker</i>		Sebagai wadah sampel

Nama	Gambar	Keterangan
Kertas saring		Penyaring larutan
<i>Hotplate</i>		Pengaduk larutan sampel
Neraca analitik		Menimbang sampel
Oven		Pengering sampel

Nama	Gambar	Keterangan
<i>Furnance</i>		Sebagai pemanas untuk sampel magnetit-TiO ₂
Ayakan		Menyaring pasir besi
<i>spektrofotometer</i> UV-Vis		Pengukur absorban suatu sampel
<i>Centrifugator</i>		Pemisahan supernatan dari solid pada tiap interval analisa sebelum diukur absorbannya menggunakan <i>spektrofotometer</i> Uv-vis

Nama	Gambar	Keterangan
Pipet tetes		Menetrasi larutan
Lampu UV		Pencahayaannya dalam reaktor
Lumpang dan alu		Penghalusan magnetit
Magnet batang		Memisahkan pasir besi

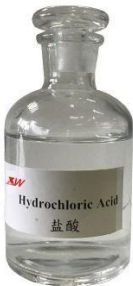
Nama	Gambar	Keterangan
<i>Magnetic Stirrer</i>		Pengadukan sampel dan larutan
<i>power supply</i>		Sebagai penyedia aliran listrik dalam metode elektrokoagulasi
Kaca 30 cm × 15 cm × 15 cm		Sebagai wadah penampung zat warna metilen biru
Elektroda Alumunium ukuran 10 cm × 20 cm		Sebagai plat eletroda pada proses elektrokoagulasi
Jepit Buaya		Sebagai penyambung kabel plat elektroda dengan kabel penghubung

3.3.2 Bahan

Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 3.2 sebagai berikut :

Tabel 3.2 Bahan-Bahan Penelitian

Nama Bahan	Gambar	Keterangan
TiO ₂ anatase bubuk		Katalis untuk proses fotokatalis
Metilen Biru		Limbah yang akan didegradasi
Aquades		Pembersih alat-alat dari kontaminan

Nama Bahan	Gambar	Keterangan
Etanol		Pelarut bahan kimia
NH ₄ OH		Larutan pengendap magnet
HCL 37%		Larutan campuran magnetit
Pasir Besi		Bahan magnetit

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Teknik Preparasi Pasir Besi

- 1) Sampel pasir besi diambil terlebih dahulu dari Pantai Anoi Itam, Sabang.
- 2) Setelah itu, pemisahan pasir besi alami dari material nonmagnetik dilakukan dengan memanfaatkan batang magnet sebagai alat pemisah.

- 3) Hasil pemisahan kemudian diayak menggunakan saringan berukuran 60 *mesh* agar diperoleh ukuran butir yang seragam.
- 4) Selanjutnya, pasir besi dicuci dengan aquades dan dikeringkan menggunakan oven.

3.4.2 Teknik sintesis Magnetit Fe_3O_4 dengan Metode Kopresipitasi

- 1) 20 gram pasir besi diambil dan dimasukkan ke dalam gelas *beaker*, lalu ditambahkan 50 ml larutan HCl 37%. Campuran tersebut kemudian di homogenkan dengan menggunakan *hotplate* pada kecepatan 800 rpm dan dipanaskan dengan suhu 80°C dalam waktu 30 menit. Setelah proses tersebut, campuran kemudian disaring menggunakan kertas saring.
- 2) Larutan hasil dari proses saringan tersebut dilakukan titrasi dengan menambahkan 6,5 mol larutan amonia (NH_4OH) menggunakan pipet tetes dengan perbandingan 1:5 kemudian di homogenkan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 800 rpm, dipanaskan dengan temperatur 80°C , dengan waktu 30 menit.
- 3) Selanjutnya, endapan yang dihasilkan dari proses kopresipitasi dibersihkan dengan air suling sampai pH larutan menjadi netral untuk menghapus bahan basa. Endapan itu kemudian dikeringkan di oven pada temperatur 100°C selama 90 menit hingga berubah menjadi serbuk kering.
- 4) Setelah menjadi serbuk, Fe_3O_4 dihaluskan dengan lumpang lalu diayak pada ayakan 200 *mesh*.
- 5) Serbuk Fe_3O_4 yang diperoleh selanjutnya disimpan dalam botol kaca kecil dan ditutup dengan erat untuk keperluan karakterisasi yang akan dilakukan berikutnya.

3.4.3 Proses Penggabungan Fe_3O_4 - TiO_2

- 1) Serbuk pasir besi yang mengandung Fe_3O_4 dicampur dengan TiO_2 anatase, berdasarkan riset sebelumnya dalam Yansa N.S (2023), hasil proses fotodegradasi yang paling optimum terjadi pada rasio masa 2:1 dengan penyinaran 86,52%. Setelah itu, pada masing-masing gelas *beaker* ditambahkan etanol sebanyak 33%.
- 2) Kemudian diaduk menggunakan *shaker* selama 30 menit pada kecepatan 130 rpm

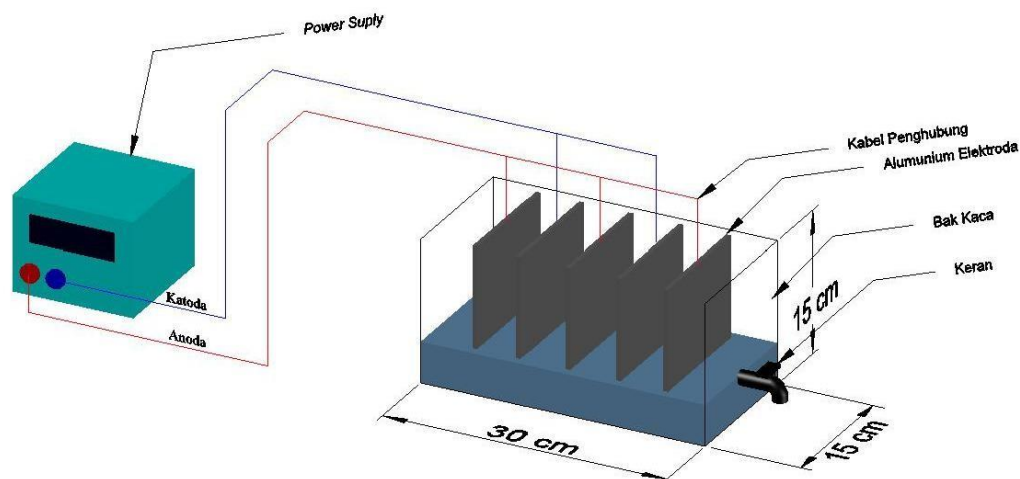
- 3) Disaring dengan kertas saring, dikeringkan dengan oven, dan dihaluskan menggunakan lumpang

3.4.4 Pengujian Katalis Magnetit (Fe_3O_4) – TiO_2

Pengujian fotokatalis magnetit- TiO_2 telah dilakukan sebelumnya oleh Yansa dan rekan-rekannya pada tahun 2023. Oleh sebab itu, penelitian yang dilakukan saat ini merupakan kelanjutan dan pengembangan dalam proses fotodegradasi zat warna metilen biru. Untuk menjaga konsistensi hasil karakterisasi fotokatalis pada pengujian XRD dan VSM, penelitian ini mengikuti prosedur yang sama, dimulai dari penggunaan bahan baku pasir besi yang berasal dari daerah Anoi Itam, Sabang, dengan langkah preparasi pasir besi yang serupa, serta tahap sintesis menggunakan metode kopresipitasi. Proses penggabungan magnetit- TiO_2 juga dilakukan dengan cara yang sama, yaitu pengadukan mekanik menggunakan alat water bath.

3.4.5 Desain Reaktor Elektrokoagulasi

Reaktor koagulasi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki ukuran 30 cm × 15 cm × 15 cm dan dibuat dari material kaca dengan ketebalan 5 mm, sehingga memberikan kekuatan serta transparansi yang memudahkan pemantauan proses. Setiap elektroda pada reaktor elektrokoagulasi terdiri dari plat aluminium berukuran panjang 10 cm × 20 cm, yang dipilih karena aluminium merupakan logam yang sangat ekonomis, mudah diperoleh, tidak beracun, serta terbukti efektif dalam proses elektrokoagulasi (Ibrahim et al., 2023). Penggunaan 5 plat elektroda dipilih karena memungkinkan pengaturan jarak antar elektroda secara proporsional. Hal ini menjaga resistansi listrik tetap rendah sehingga arus listrik dapat mengalir secara efektif tanpa menyebabkan konsumsi energi berlebih atau pemanasan berlebihan pada larutan. Untuk memastikan arus listrik yang diperlukan selama proses elektrokoagulasi dapat mengalir dengan baik, reaktor elektrokoagulasi ini dihubungkan langsung ke *power supply*. Hal ini menjamin suplai energi listrik yang stabil dan cukup untuk mendukung reaksi elektrokimia dalam pembentukan koagulan. Berikut rancangan desain Elektrokoagulasi bisa dilihat pada Gambar 3.3.

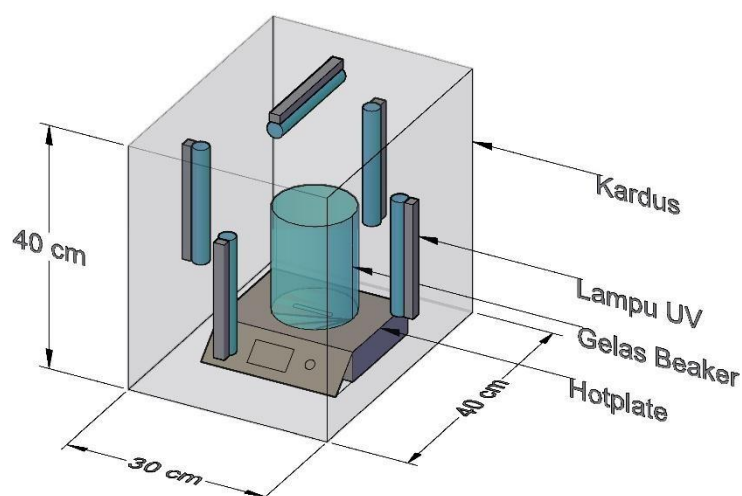


Gambar 3.3 Desain Reaktor Elektrokoagulasi

3.4.6 Desain Reaktor Fotokatalisis

Dalam penelitian ini, akan dilakukan proses fotokatalisis di dalam sebuah reaktor tertutup yang dirancang dengan ukuran 40 cm × 30 cm × 40 cm. Reaktor ini dilengkapi dengan lima lampu UV-A berkapasitas 10 watt, di mana masing-masing lampu UV ditempatkan di sisi kanan, kiri, depan, belakang, dan di bagian atas penutup kotak. Sinar UV-A adalah jenis sinar dengan panjang gelombang paling tinggi dibandingkan dengan sinar UV lainnya. Panjang gelombang UV-A berkisar antara 315 nm hingga 400 nm (Husein, 2023). Jarak antara lampu dan limbah cair Metilen Biru (MB) baik di sisi kanan, sisi kiri, maupun atas kotak adalah 6 cm.

Dinding reaktor ditutupi dengan foil aluminium yang berperan sebagai cerminan untuk memfokuskan cahaya pada sampel limbah MB. Energi yang dihasilkan oleh lampu UV dalam reaktor ini dapat mengaktifkan *Titanium Dioksida* (TiO_2) sehingga bisa dimanfaatkan dalam proses fotokatalisis. Gelas *beaker* berkapasitas 1000 ml digunakan sebagai wadah untuk mencampurkan pewarna MB dengan diletakkan di atas *hot plate*, kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnet. Setelah itu, katalis TiO_2 dapat digunakan pada proses fotokatalisis dalam suhu ruangan dengan bantuan sinar UV dengan tanpa diaduk. Berikut rancangan desain reaktor tertutup bisa dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Desain Reaktor Fotokatalis

3.4.7 Jenis Elektroda

Dalam penelitian ini, elektroda yang digunakan adalah plat aluminium dengan ukuran 10 cm × 20 cm. Aluminium dipilih karena memiliki keunggulan berupa harga yang terjangkau, kestabilan kimia yang baik dalam proses elektrokoagulasi, serta efektif menghasilkan ion aluminium yang berperan sebagai koagulan aktif. Plat aluminium ini berfungsi sebagai anoda dan katoda dalam sistem elektrokoagulasi.

3.5 Proses Pembuatan Larutan Metilen Biru

3.5.1 Pembuatan Larutan Induk

Adapun langkah-langkah dalam pembuatan larutan Metilen Biru yaitu:

- 1) Larutan MB dengan konsentrasi 5000 ppm dibuat dengan cara menimbang sebanyak 0,5 g padatan metilen biru terlebih dahulu, kemudian padatan tersebut dilarutkan dalam 100 ml aquades.
- 2) Proses pelarutan dilakukan secara bertahap dengan menuangkan akuades sedikit demi sedikit hingga padatan metilen biru larut sempurna.
- 3) Selanjutnya, larutan diaduk secara merata hingga homogen dan siap digunakan sebagai larutan stok Metilen Biru 5000 ppm.

3.5.2 Pembuatan Larutan Standar

Adapun langkah-langkah dalam pembuatan larutan deret standar dari larutan induk MB 5000 ppm yaitu

- 1) Disiapkan Bak kaca yang akan diisi dengan larutan deret standar metilen biru (MB) dengan konsentrasi 20 ppm.
- 2) Bak kaca kemudian diisi sebanyak 20 mL larutan deret standar, di ditambahkan aquades sampai mencapai 5 liter. Penghitungan konsentrasi larutan standar dilakukan menggunakan Persamaan 3.1.

$$V_1.M_1 = V_2.M_2 \dots\dots\dots 3.1$$

Dimana:

V_1 = Volume sebelum pengenceran (ml)

M_1 = Konsentrasi sebelum pengenceran (ppm)

V_2 = Volume setelah pengenceran (ml)

M_2 = Konsentrasi setelah pengenceran (ppm)

3.6 Penentuan Nilai Rapat Arus Elektrokoagulasi

Penentuan nilai rapat arus (*current density*) pada proses elektrokoagulasi sangat penting untuk mengoptimalkan efisiensi degradasi zat warna metilen biru. Rapat arus didefinisikan sebagai arus listrik yang melewati satuan luas elektroda dan dinyatakan dengan satuan mA/cm² dan A/m².

Dalam hal ini, untuk menentukan nilai rapat arus digunakan pendekatan Hukum Ohm dapat dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$R = \rho \times (d/A) \dots\dots\dots 3.2$$

Dimana:

R = Hambatan (Ohm)

ρ = Resistivitas Larutan (ohm·cm)

d = Jarak Antar Elektroda (cm)

A = Luas Permukaan Elektroda (cm²)

Hitung arus total dengan Persamaan 3.3.

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots 3.3$$

Dimana:

I = Arus Total (A)

V = Tegangan (Volt)

R = Hambatan (Ohm)

Untuk menentukan nilai rapat arus listrik dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.4.

$$J = \frac{I}{A} \quad 3.4$$

Dimana:

J = Rapat Arus (mA/cm²)

I = Arus Total (A)

A = Luas penampang (cm²)

3.7 Tahapan Fotodegradasi dengan Sistem Terintegrasi EC-Fotokatalisis

3.7.1 Fotodegradasi Metilen Biru dengan Metode Elektrokoagulasi

- 1) Masukkan larutan metilen biru dengan konsentrasi 20 ppm dalam reaktor elektrokoagulasi dengan kapasitas 5 liter.
- 2) Susun elektroda alumunium ke dalam reaktor elektrokoagulasi secara paralel dengan jarak antar elektroda 5 cm. Kemudian hubungkan elektroda dengan *power supply* guna mengatur rapat arus listrik.
- 3) Pengujian dimulai dengan mengatur kerapatan arus listrik pada nilai 10 mA/cm² dan dilakukan selama waktu kontak yang telah ditentukan, yaitu 30 menit, dan 60 menit. Setelah selesai, pengujian ini diulangi dengan mengatur kerapatan arus pada nilai yang lebih tinggi, yaitu 20 mA/cm² dan 30 mA/cm².
5. Ambil sampel larutan sebanyak 50 ml pada setiap waktu kontak yaitu 30 menit, dan 60 menit untuk dilakukan pengujian TSS, COD, pH, uji serapan optik, dan konsentrasi metilen biru yang tertinggal menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

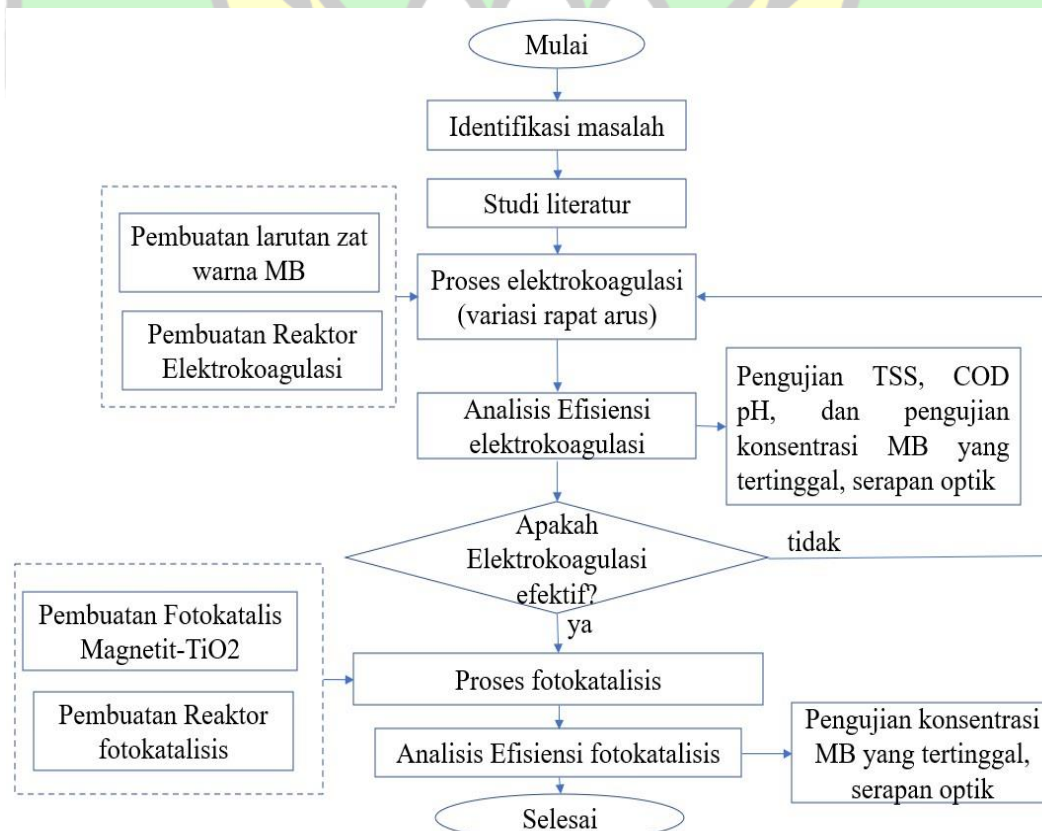
3.7.2 Fotodegradasi Metilen Biru dengan Metode Fotokatalisis

- 1) Larutan zat warna metilen biru digunakan dari hasil proses elektrokoagulasi yang terbaik dari tahap 1 sebanyak 1 liter.
- 2) Proses degradasi diawali dengan menyiapkan 1 *beaker glass* yang diisi dengan zat warna metilen biru hasil pengujian terbaik dari proses elektrokoagulasi.

- 3) Dalam *beaker glass* dimasukkan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ pada perbandingan 2:1 dengan massa 5 gram dan dilakukan homogenisasi dengan diaduk pada kecepatan 400 rpm selama 30 menit dengan kondisi tanpa penyinaran.
- 4) Pengadukan dihentikan dan dilakukan penyinaran menggunakan sinar UV dengan waktu kontak 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit.
- 5) Dari setiap waktu kontak akan diambil larutan tersebut sebanyak 25 ml utk dilakukan sentrifugasi dengan kecepatan 4000 rpm selama 5 menit.
- 6) Hasil sentrifugasi ini menghasilkan adanya pemisahan antara fotokatalis dan larutan, dimana fototalisnya akan membentuk endapan.
- 7) Larutan bagian atas dari sentrifugasi ini diambil untuk pengujian serapan optik menggunakan Spektrofotometer UV-Vis.
- 8) Nilai serapan optik yang terbaca dari larutan zat warna sebelum dan sesudah proses fotokatalis ini dianalisis untuk menentukan nilai konsentrasi metilen biru yang tertinggal.

3.7.3 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.8 Analisis Data

3.8.1 Efektivitas Elektrokoagulasi dan Fotokatalisis

Menghitung persentase penurunan zat warna metilen biru berdasarkan setiap parameter yang diukur sebelum dan setelah proses elektrokoagulasi dan fotokatalisis adalah tujuan dari fase analisis data dalam studi ini. Menilai efisiensi penghilangan pencemar dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.5 berikut:

$$\% D = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \dots \dots \dots \text{Persamaan 3.5}$$

Dimana:

%D = adalah % degradasi

C_0 = adalah konsentrasi awal

C = adalah konsentrasi akhir

3.8.2 Pengukuran *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Parameter COD digunakan untuk mengukur banyaknya kebutuhan oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi senyawa organik dalam sampel air secara kimiawi. Pengukuran COD pada proses elektrokoagulasi–fotokatalisis bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana sistem mampu menurunkan konsentrasi zat organik, khususnya metilen biru, sebagai indikator efisiensi proses degradasi. Penurunan nilai COD setelah perlakuan menunjukkan keberhasilan sistem dalam menguraikan zat warna menjadi senyawa yang lebih sederhana atau tidak berbahaya.

3.8.3 Pengukuran *Potential of Hydrogen* (pH)

Parameter pH merupakan salah satu indikator penting dalam proses elektrokoagulasi–fotokatalisis karena pH larutan dapat memengaruhi kinerja fotodegradasi zat warna metilen biru. Nilai pH yang diukur sebelum dan sesudah proses bertujuan untuk mengetahui perubahan keasaman atau kebasaan larutan akibat reaksi kimia yang terjadi selama proses berlangsung.



BAB IV

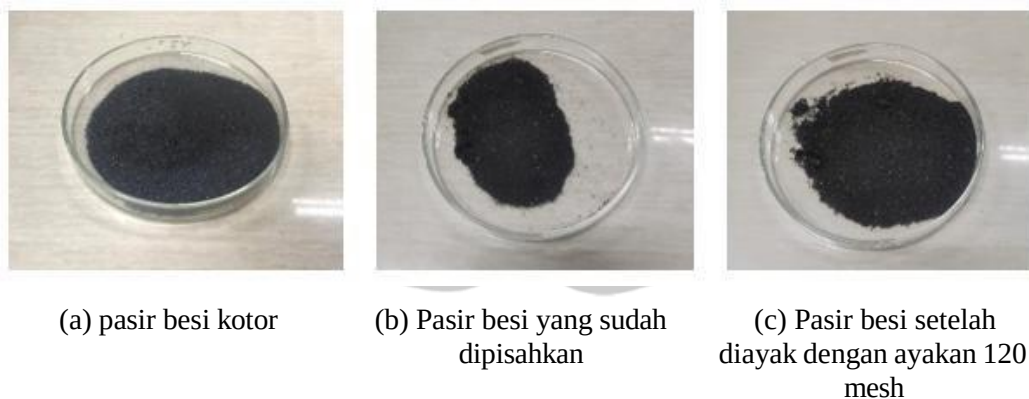
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan Penelitian

Pada Penelitian ini, proses degradasi zat warna metilen biru dilakukan menggunakan sistem kombinasi sekuensial elektrokoagulasi-fotokatalisis dengan menggunakan plat elektroda alumunium dan variasi kerapatan arus pada proses elektrokoagulasi yaitu $10,08 \text{ mA/cm}^2$, $20,25 \text{ mA/cm}^2$, dan $30,41 \text{ mA/cm}^2$, serta memanfaatkan pasir besi yang telah disintesis menjadi serbuk magnetit dan TiO_2 . Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas variasi kerapatan arus pada elektroda dan sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dalam menurunkan konsentrasi zat warna metilen biru.

4.1.1 Preparasi dan Sintesis Pasir Besi

Sebelum dilakukan proses degradasi menggunakan magnetit- TiO_2 terhadap zat warna metilen biru, pasir besi yang berfungsi sebagai sumber material magnetit pendukung harus terlebih dahulu melalui tahap preparasi. Proses preparasi pasir besi melibatkan beberapa tahapan, yakni pemisahan, pengayakan, penggerusan, perendaman, pengeringan, dan pemanasan. Pasir besi yang telah dipisahkan dan diayak kemudian dicuci menggunakan aquades dan dikeringkan dalam oven agar diperoleh ukuran butiran yang seragam. Hasil daripada preparasi dan sintesis pada pasir besi (magnetit) dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Hasil preparasi dan sintesis pasir besi

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, pasir besi dalam kondisi alami sebelum proses preparasi memiliki tekstur yang kasar, berukuran relatif besar, dan masih tercampur dengan pasir lain. Setelah melalui tahap preparasi, pasir besi

memiliki tekstur yang lebih halus dan berwarna abu-abu. Selanjutnya, pasir besi yang telah disintesis menjadi magnetit menunjukkan perubahan menjadi bertekstur halus dengan warna hitam pekat.

4.1.2 Proses Penggabungan Fe_3O_4 - TiO_2

Proses Penggabungan Fe_3O_4 - TiO_2 dapat dilihat pada gambar 4.3. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, magnetit terlebih dahulu dicampur dengan TiO_2 dengan perbandingan rasio 2:1, kemudian ditambahkan 150 ml etanol dengan konsentrasi 33%, setelah itu campuran tersebut diaduk menggunakan alat shaker pada kecepatan 130 rpm selama 30 menit. Adapun proses penggabungan magnetit dengan TiO_2 dapat dilihat pada Gambar 4.3.



(a) Magnetit

(b) TiO_2

(c) Shaker

Gambar 4.2 Proses Penggabungan Magnetik dengan TiO_2

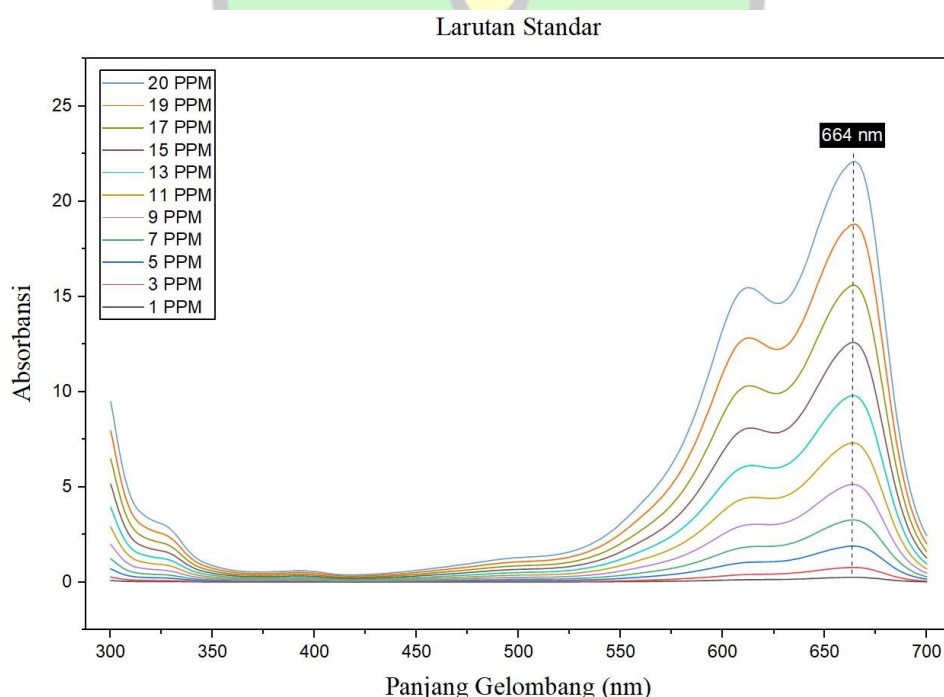
Selanjutnya, larutan penggabungan ini disaring menggunakan kertas saring dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 105°C selama 1 jam. Setelah itu, dihaluskan menggunakan lumpang dan disaring dengan ayakan berukuran 200 mesh. Detail dari setiap tahap penggabungan magnetit- TiO_2 dapat dilihat pada Gambar 4.4. Penggabungan magnetit- TiO_2 dengan perbandingan 2:1 akan menghasilkan warna ke abu-abuan.



Gambar 4.3 Hasil Penggabungan Magnetit- TiO_2

4.3 Penentuan Spektrum Serapan Optik Larutan Zat Warna Metilen Biru

Panjang gelombang maksimum ($\lambda_{\max}$) adalah panjang gelombang di mana absorbansi mencapai nilai tertinggi. Nilai ini diperoleh melalui pengukuran larutan metilen biru menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Nilai panjang gelombang maksimum ($\lambda_{\max}$) pada larutan zat warna metilen biru (MB) setelah diidentifikasi menggunakan beberapa variasi konsentrasi yaitu 1 ppm, 3 ppm, 5 ppm, 7 ppm, 9 ppm, 11 ppm, 13 ppm, 15 ppm, 17 ppm, 19 ppm, dan 20 ppm yang dilakukan pada daerah tampak dengan rentang panjang gelombang 300-700 nm, rentang panjang gelombang bisa dilihat pada Gambar 4.5.



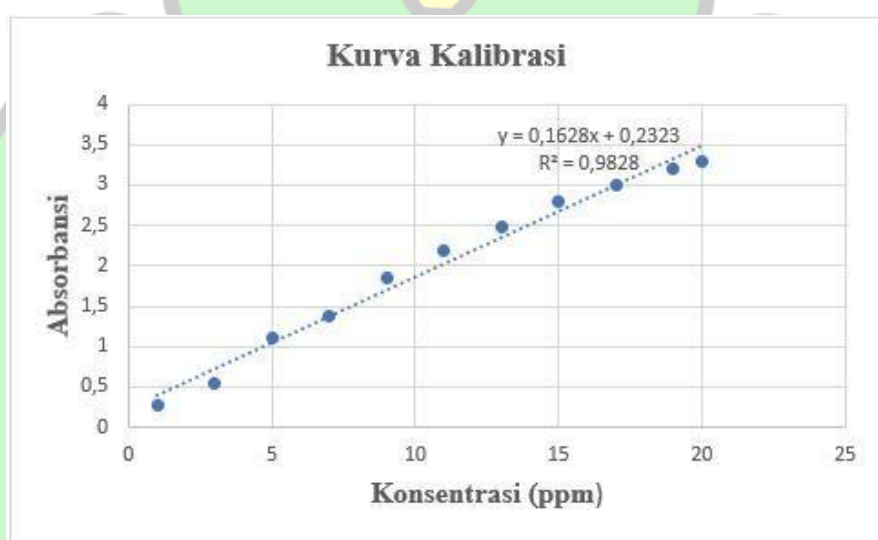
Gambar 4.4 Panjang Gelombang Maksimum Metilen Biru

Dari Gambar 4.5 di atas, serapan optik metilen biru untuk rentang panjang gelombang 300-700 nm diperoleh nilai puncak maksimum pada 664 nm. Nilai absorbansi pada panjang gelombang 664 dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai Konsentrasi dan Nilai Absorbansi Larutan Metilen Biru Sebagai Larutan Standar

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi
1	0,261432
3	0,534669
5	1,116198

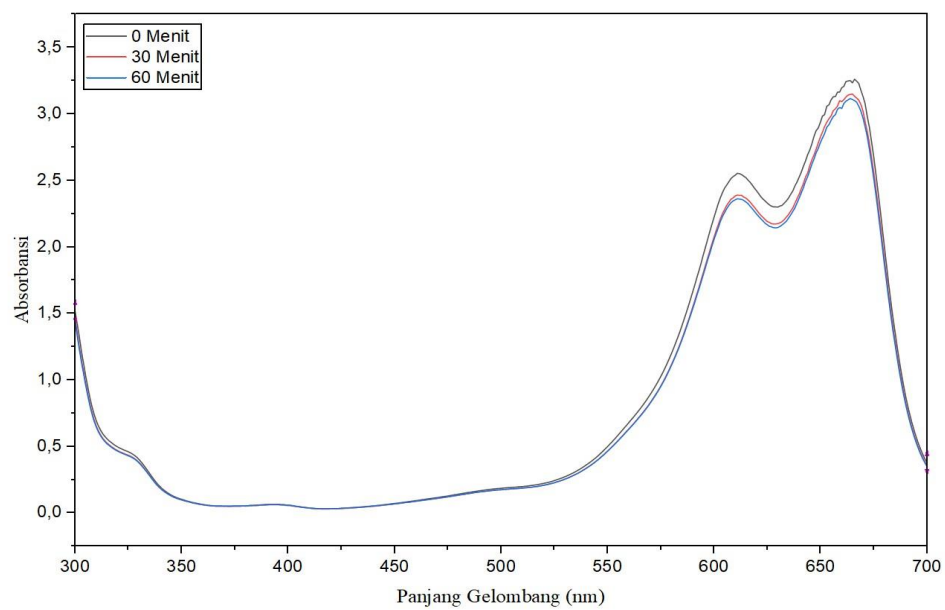
7	1,377653
9	1,859089
11	2,182502
13	2,483779
15	2,793117
17	2,996369
19	3,198191
20	3,294367



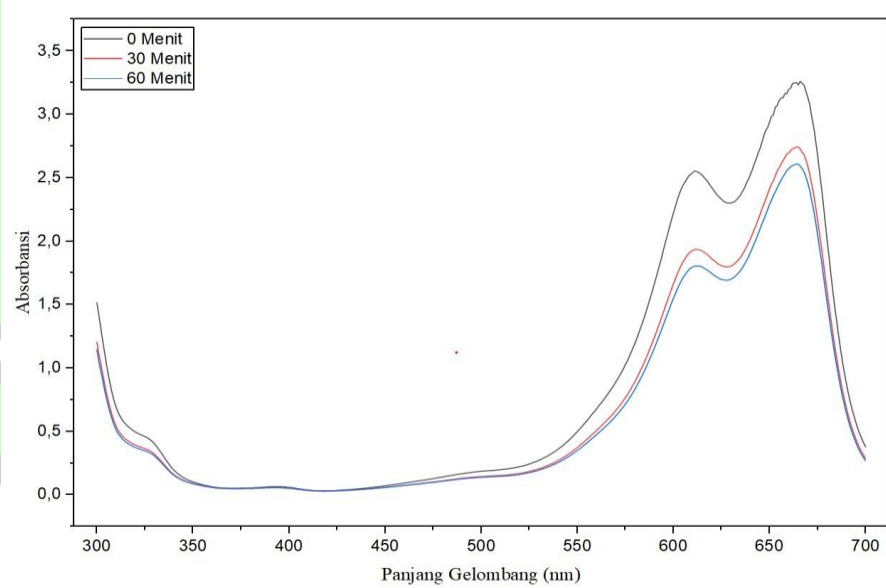
Gambar 4.5 Kurva Kalibrasi Larutan Metilen Biru

Dari Gambar 4.6 di dapatkan bentuk garis linier antara konsentrasi larutan zat warna metilen biru dan nilai absorbansinya diperoleh persamaan $y = 0,1628x + 0,2323$ dengan $R^2 = 0,9828$. Persamaan ini digunakan untuk menghitung nilai konsentrasi setelah fotodegradasi larutan metilen biru.

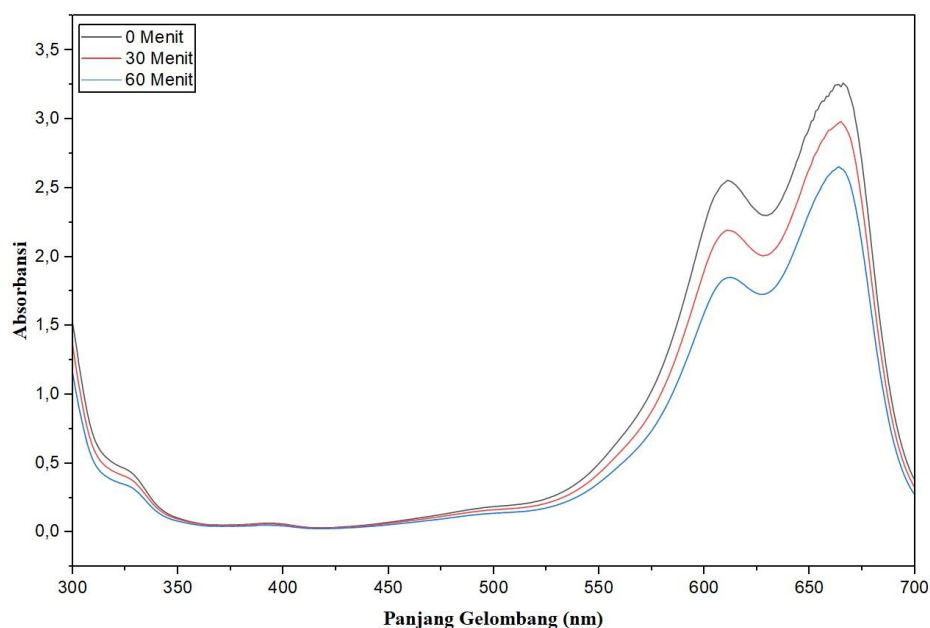
Panjang gelombang sampel larutan metilen biru yang sudah dilakukan elektrokoagulasi dengan variasi rapat arus $10,08 \text{ mA/cm}^2$, $20,25 \text{ mA/cm}^2$, dan $30,41 \text{ mA/cm}^2$ dengan waktu kontak 30, dan 60 menit dapat dilihat pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9.



Gambar 4.6 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat Arus 10,08 mA/cm²



Gambar 4.7 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat Arus 20,25 mA/cm²



Gambar 4.8 Spektrum Hasil EC Serapan Optik untuk Variasi Rapat 30,41 mA/cm²

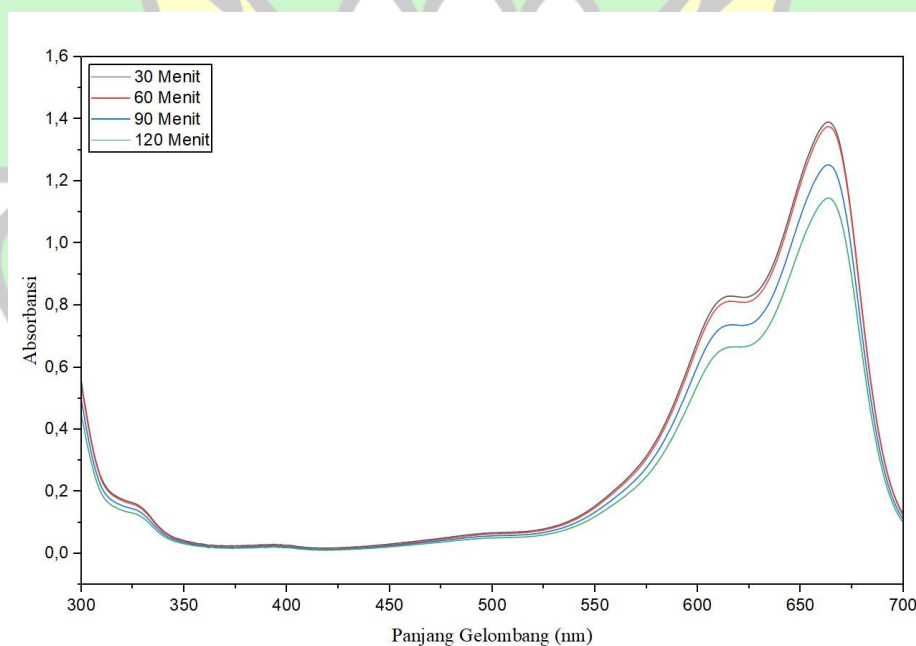
Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9 di atas menampilkan kurva spektrum absorbansi larutan metilena biru hasil proses elektrokoagulasi pada variasi waktu reaksi (0, 30, dan 60 menit). Sumbu x pada grafik menunjukkan rentang panjang gelombang dari 300 hingga 700 nm, sementara sumbu y menunjukkan nilai absorbansi.

Pada spektrum di atas terdapat puncak absorbansi utama, yaitu pada panjang gelombang 664 nm. Puncak ini merupakan karakteristik khas metilena biru, yang menunjukkan interaksi cahaya dengan molekul pewarna pada panjang gelombang tertentu. Seiring bertambahnya waktu reaksi, nilai absorbansi pada puncak tersebut terlihat menurun, mengindikasikan terjadinya degradasi atau penurunan konsentrasi metilena biru dalam larutan.

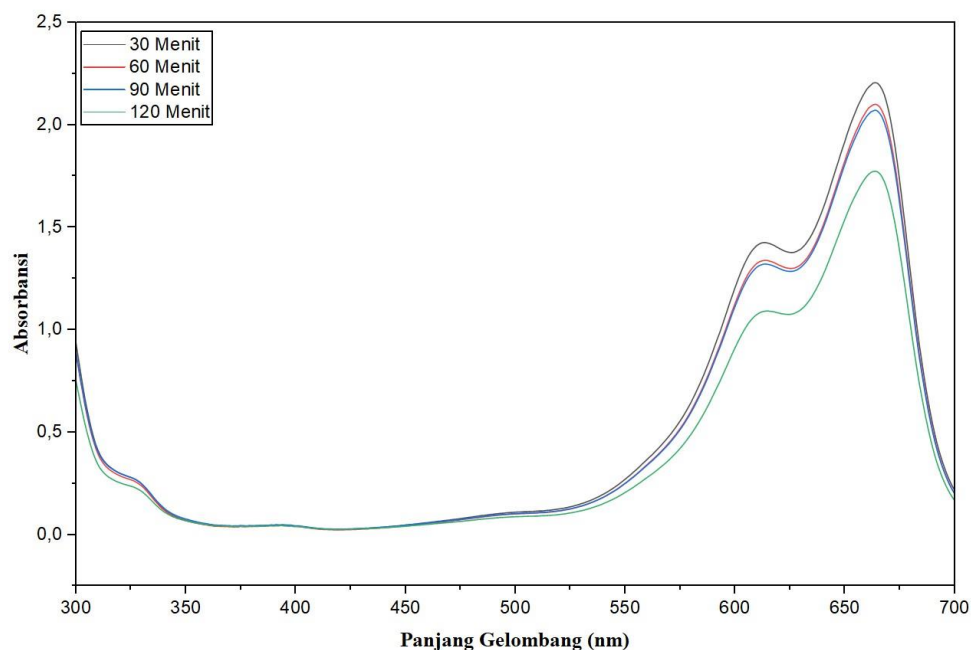
Pada Gambar 4.7 penurunan absorbansi dari menit 0 ke menit 60 tidak terlalu drastis. Hal ini menunjukkan bahwa rapat arus 10,08 mA/cm² dalam proses elektrokoagulasi kurang optimal dalam menurunkan konsentrasi zat warna metilena biru, puncak absorbansi masih cukup tinggi bahkan setelah 60 menit. Pada gambar 4.8 terdapat penurunan absorbansi yang lebih jelas dari menit ke-0 hingga 60. Hal ini menandakan bahwa peningkatan tegangan meningkatkan efektivitas proses elektrokoagulasi. Pada panjang gelombang puncak mengalami penurunan

absorbansi yang signifikan, yang berarti lebih banyak kontaminan yang berhasil di removal atau terkoagulasi dalam waktu yang sama dibandingkan dengan $10,08 \text{ mA/cm}^2$. Pada gambar 4.9 penurunan absorbansi juga terjadi, Setelah 60 menit, absorbansi turun hampir sejajar dengan $20,25 \text{ mA/cm}^2$, menandakan proses pembersihan yang juga efektif. Tegangan yang lebih tinggi mempercepat proses degradasi, tetapi penurunan absorbansi tidak jauh lebih besar dibandingkan dengan $20,25 \text{ mA/cm}^2$.

Setelah dilakukan proses elektrokoagulasi pada variasi kerapatan arus, di dapatkan bahwa tegangan $20,25 \text{ mA/cm}^2$ menghasilkan tingkat degradasi metilen biru paling maksimal. Oleh karena itu, larutan metilen biru hasil elektrokoagulasi pada kondisi ini, sebanyak 1 liter, digunakan sebagai sampel untuk tahap berikutnya, yakni proses degradasi lanjutan dengan metode fotokatalisis. Langkah ini dimaksudkan agar efisiensi penurunan konsentrasi zat warna menjadi lebih tinggi melalui sistem terintegrasi kedua metode tersebut. Hasil spektrum absorbansi yang diperoleh dari proses fotokatalisis ini dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4.9 Spektrum Hasil Fotokatalisis Magnetit-TiO₂ Pada Penyinaran Sinar UV



Gambar 4.10 Spektrum Hasil Fotokatalisis Magnetit-TiO₂ Tanpa Penyinaran

Berdasarkan gambar 4.9 pada proses fotokatalisis menggunakan sinar UV menunjukkan bahwa terjadinya penurunan absorbansi. Seiring bertambahnya waktu fotokatalisis dari 30 hingga 120 menit, terjadi penurunan absorbansi yang konsisten menandakan bahwa konsentrasi metilen biru dalam larutan semakin berkurang. Pada Gambar 4.10 pada proses fotokatalisis tanpa penyinaran juga menunjukkan adanya penurunan absorbansi, tetapi tidak se-signifikan pada spektrum dengan penyinaran menggunakan sinar UV yang menandakan degradasi zat warna berlangsung lebih lambat.

4.3.1 Pengujian COD dan pH Metilen Biru

Berdasarkan tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan pH pada proses elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda aluminium (Al). Pengujian dilakukan dengan variasi rapat arus listrik (10, 20, dan 30 mA/cm²) dan waktu reaksi (30 dan 60 menit). Pada kondisi awal menunjukkan nilai COD larutan sebesar 71 mg/L. Penerapan rapat arus 10,08 mA/cm² selama 30 menit menurunkan COD menjadi 63 mg/L dan menjadi 19 mg/L setelah 60 menit. Pada rapat arus 20,25 mA/cm² COD turun menjadi 26 mg/L setelah 30 menit dan menjadi 25 mg/L setelah 60 menit. Sedangkan pada rapat arus

30,41 mA/cm² nilai COD tercatat sebesar 62 mg/L untuk 30 menit dan 14 mg/L untuk 60 menit.

Tabel 4.2 Nilai Parameter COD dan pH Metilen Biru

Jenis Elektroda	Kerapatan Arus (mA/cm ²)	Waktu (menit)	COD (mg/l)	pH
0			71	7,0
Al	10	30	63	
		60	19	
	20	30	26	
		60	25	
	30	30	62	
		60	14	
Baku mutu			150	

4.4 Analisis Data dan Pembahasan

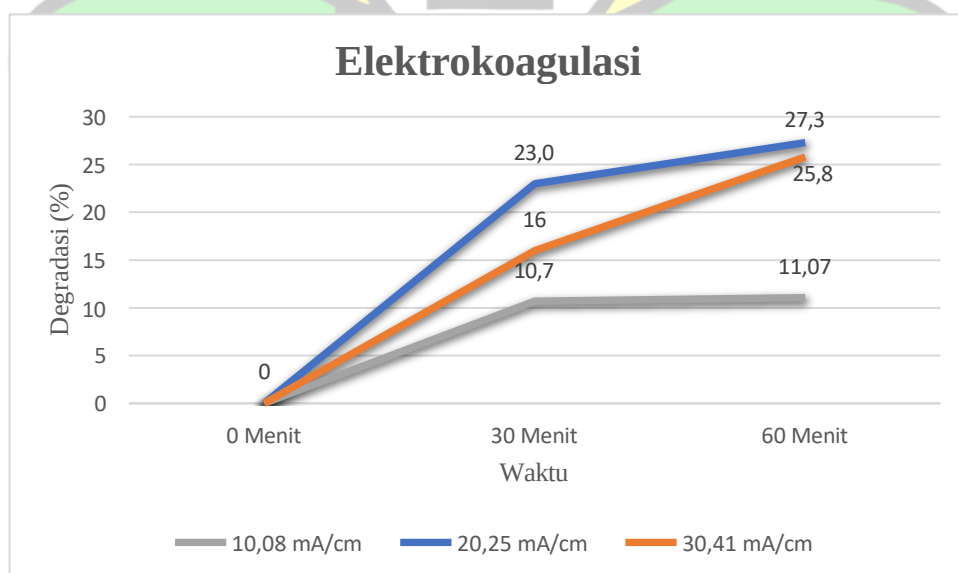
4.4.1 Pengaruh Kerapatan Arus dalam Sistem Elektrokoagulasi

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terlihat bahwa rapat arus memiliki pengaruh dalam penurunan konsentrasi zat warna metilen biru. Pengaruh rapat arus yang terjadi pada proses elektrokoagulasi mempengaruhi jumlah anoda yang terlarut seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Hal ini meningkatkan pembentukan Al(OH)₃ dan meningkatkan efektivitas degradasi zat warna metilen biru. Untuk mengetahui rapat arus optimal terhadap penurunan konsentrasi metilen biru, dilakukan uji absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk melihat konsentrasi metilen biru yang tersisa. Hasil uji absorbansi metilen biru dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.3 Hasil Absorbansi Elektrokoagulasi Metilen Biru

Tegangan (V)	Waktu (Menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
0		3,47436	20	
10	30	3,146572	17,9	10,7
	60	3,116135	17,7	11,7
20	30	2,744041	15,4	23,0
	60	2,609842	14,5	27,3
30	30	2,972556	16,8	16,0
	60	2,654131	14,9	25,8

Berdasarkan tabel diatas, Pada rapat arus $10,08 \text{ mA/cm}^2$, penurunan konsentrasi metilen biru relatif rendah. Absorbansi larutan setelah 30 menit adalah 3,146572 dengan konsentrasi 17,9 ppm, menghasilkan persen degradasi sebesar 10,7%. Setelah diperpanjang ke 60 menit, absorbansi sedikit menurun menjadi 3,116135, dengan konsentrasi 17,7 ppm dan degradasi 11,7%. Kenaikan efektivitas pada waktu yang lebih lama tidak terlalu signifikan, menunjukkan bahwa tegangan rendah kurang optimal untuk menurunkan konsentrasi zat warna. Rapat arus $20,25 \text{ mA/cm}^2$ memberikan hasil penurunan konsentrasi yang paling baik. Pada 30 menit, absorbansi sebesar 2,744041 dan konsentrasi 15,4 ppm menghasilkan degradasi sebesar 23,0%. Pada 60 menit, terjadi penurunan lebih lanjut menjadi 2,609842 dengan 14,5 ppm dan degradasi mencapai 27,3%. Penggunaan tegangan ini lebih efektif mempercepat reaksi elektrokoagulasi, sehingga penurunan konsentrasi dan persentase degradasi kedua nilai waktu jauh lebih tinggi dibandingkan rapat arus lain. Pada rapat arus $30,41 \text{ mA/cm}^2$, penurunan konsentrasi dan degradasi tidak setinggi tegangan 20 mA/cm^2 pada interval waktu yang sama. Absorbansi pada 30 menit adalah 2,972556, ppm 16,8, dan degradasi 16,0%. Untuk 60 menit, absorbansi turun menjadi 2,654131, ppm 14,9, dan degradasi 25,8%. Meskipun nilai degradasi naik di waktu yang lama, hasilnya masih di bawah rapat arus $20,25 \text{ mA/cm}^2$. Perbandingan hasil elektrokoagulasi dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.11 Grafik Hasil Elektrokoagulasi Untuk Variasi Rapat Arus 10,20,dan 30 mA/cm^2

Berdasarkan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penurunan kadar zat warna selama proses elektrokoagulasi sangat dipengaruhi oleh kuat arus listrik yang digunakan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk penurunan kadar metilen biru dan rodamin B dicapai pada kuat arus 5 A, dengan efisiensi penyisihan mencapai 93,48% untuk metilen biru (Fauziah, 2018).

Berdasarkan data pengujian, tegangan 20,25 mA/cm² olt lebih efektif dibandingkan 30,41 mA/cm² dalam menurunkan konsentrasi metilen biru. Walaupun secara prinsip peningkatan tegangan dapat memperbanyak pembentukan koagulan dan melakukan degradasi lebih cepat, namun pada nilai terlalu tinggi efisiensi penurunan konsentrasi justru stagnan atau menurun. Hal ini . Pada penelitian yang dilakukan oleh (saputra, 2022) menyatakan bahwa meskipun peningkatan arus listrik pada elektrokoagulasi umumnya meningkatkan efisiensi degradasi, terdapat titik optimum di mana efisiensi maksimal dicapai, yaitu pada sekitar 20-25 volt. Pada arus atau tegangan yang lebih tinggi seperti 30,41 mA/cm², efisiensi tidak selalu meningkat sebanding dan bisa menurun akibat pembentukan flok berlebih dan konsumsi energi yang tidak efisien yang dapat menghambat proses degradasi.

4.4.2 Efektivitas Fotodegradasi Metilen Biru pada Sistem Terintegrasi Elektrokoagulasi-Fotokatalisis

Penelitian ini menggunakan sistem terintegrasi elektrokoagulasi dan fotodegradasi untuk mengurangi konsentrasi zat warna metilen biru. Pada tahap awal, elektrokoagulasi dilakukan menggunakan lima plat elektroda aluminium berukuran 10 × 20 cm dengan variasi rapat arus 10, 20, dan 30 mA/cm² pada tegangan 10, 20, dan 30,41 mA/cm² serta waktu kontak 30 dan 60 menit. Pada tiap interval waktu, diambil sampel sebanyak 50 ml untuk diukur nilai absorbansinya menggunakan *spektrofotometer UV-Vis* pada rentang panjang gelombang 300-700 nm. Larutan hasil elektrokoagulasi terbaik kemudian diolah lebih lanjut dengan proses fotodegradasi menggunakan fotokatalis Fe₃O₄-TiO₂ sebanyak 5 gram, dengan variasi waktu kontak 30, 60, 90, dan 120 menit. Sampel diambil sebanyak 30 ml pada setiap waktu kontak, lalu disentrifugasi untuk memisahkan padatan dan larutan, kemudian larutan dianalisis menggunakan *spektrofotometer UV-Vis* untuk menentukan konsentrasi metilen biru yang tersisa. Hasil degradasi metilen biru

menggabungkan sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotodegradasi dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Degradasi Metilen Biru Untuk Sistem Terintegrasi EC-FC

Waktu (menit)	Penyisihan Metilen Biru								
	Abs. EC	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Abs. FC UV	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)	Abs. FC Non UV	Konsentrasi (ppm)	Degradasi (%)
0	3,4744	20	0	2,6098	14,5	27,30	2,6098	14,5	27,30
30	2,7440	15,4	23,0	1,3900	7,11	64,45	2,2059	12,12	39,40
60	2,6098	14,5	27,3	1,3755	7,02	64,90	2,1005	11,47	42,65
90				1,2525	6,26	68,70	2,0722	11,3	43,50
120				1,1453	5,60	72,00	1,7743	9,47	52,65

Keterangan:

Abs. EC = Nilai absorbansi untuk proses elektrokoagulasi

Abs. FC UV = Nilai absorbansi untuk proses fotokatalisis penyinaran UV

Abs. FC Non UV = Nilai absorbansi untuk proses fotokatalisis tanpa penyinaran

Tabel diatas menunjukkan persentase degradasi zat warna metilen biru pada sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis, baik dengan penyinaran maupun tanpa penyinaran pada fotokatalisis pada beberapa interval waktu reaksi.

Pada tahap elektrokoagulasi, konsentrasi metilen biru menurun dari 20 ppm menjadi 14,5 ppm dalam waktu 60 menit, dengan persen degradasi sebesar 27,3%. Selanjutnya, pada waktu reaksi 30 menit, degradasi dengan penyinaran mencapai 64,45%, jauh di atas tanpa penyinaran yang hanya 38,4%. Ini terus berlanjut di waktu berikutnya, di mana degradasi dengan penyinaran meningkat secara bertahap, yaitu 64,9% di 60 menit, 68,7% di 90 menit, dan mencapai puncak 72% pada 120 menit. Sebaliknya, degradasi tanpa penyinaran meningkat lebih lambat: 42,65% di 60 menit, 43,5% di 90 menit, dan hanya 52,65% di 120 menit.

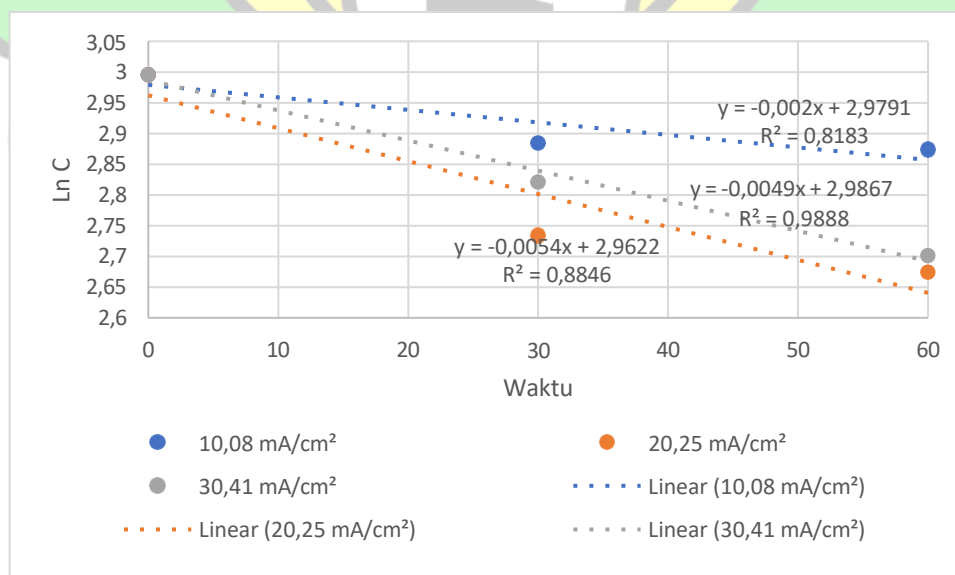
Sejalan dengan kajian (Islammiyati dkk., 2022) proses fotodegradasi metilen biru dengan katalis TiO_2 mengalami peningkatan efektivitas ketika disinari lampu UV. Penambahan material fotokatalis tanpa paparan UV memang menurunkan puncak spektrum absorbansi, namun penurunan tersebut jauh lebih signifikan saat mengalami penyinaran ultraviolet, sehingga laju degradasi larutan pewarna menjadi lebih optimal.

Penggabungan metode elektrokoagulasi dan fotodegradasi dalam penelitian ini menunjukkan sinergi yang efektif. Pada tahap awal, larutan metilen biru yang berkonsentrasi 20 ppm mengalami pengurangan konsentrasi hingga 14,5 ppm melalui proses elektrokoagulasi. Selanjutnya, larutan tersebut diproses

menggunakan fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dengan variasi waktu penyinaran 30 hingga 120 menit, yang selanjutnya menurunkan konsentrasi zat warna secara drastis ke angka 5,6 ppm. Hasil ini memperlihatkan bahwa kedua metode bekerja secara optimal, di mana elektrokoagulasi memulai proses dengan mengurangi zat warna secara fisik, sementara fotodegradasi menyelesaikan proses dengan memecah molekul secara kimiawi.

4.4.3 Pengaruh Waktu Kontak dalam Proses Elektrokoagulasi-Fotodegradasi

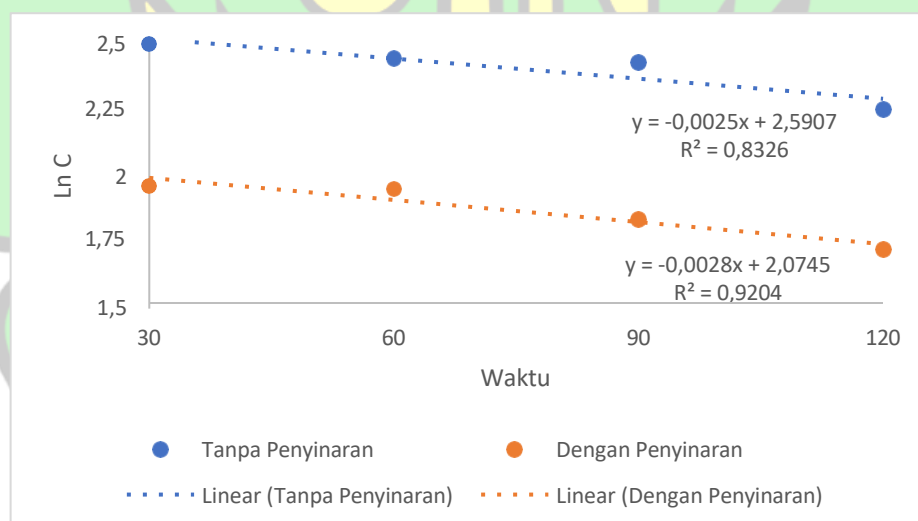
Waktu kontak memiliki signifikansi penting terhadap laju kinetika fotodegradasi. Kinetika pada reaksi kimia mengacu pada perubahan kecepatan reaksi yang biasanya dinyatakan sebagai perubahan konsentrasi reaktan atau produk dalam satuan waktu (misal molaritas per detik). Kecepatan reaksi ini menunjukkan seberapa banyak zat bereaksi atau dihasilkan setiap satuan waktu, di mana proses yang terjadi melibatkan penurunan jumlah pereaksi sekaligus peningkatan produk, dan perubahan tersebut umumnya dihitung melalui perubahan konsentrasi (Atmadani & Hidayah, 2022). Laju kinetik elektrokoagulasi dapat dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.12 Laju Kinetik Elektrokoagulasi Terhadap Waktu Kontak

Gambar 4.13 menunjukkan hubungan antara $\ln C$ dengan waktu kontak pada proses elektrokoagulasi untuk tiga variasi tegangan, yaitu 10,08 mA/cm², 20,25

mA/cm^2 , dan $30,41 \text{ mA/cm}^2$. Setiap garis pada grafik merepresentasikan model kinetika orde satu dengan persamaan linear yang berbeda, pada $10,08 \text{ mA/cm}^2$ persamaannya $y = -0,002x + 2,9791$, sehingga konstanta laju reaksinya $k = 0,002 \text{ menit}^{-1}$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,8183$. $20,25 \text{ mA/cm}^2$ diperoleh persamaan $y = -0,0054 + 2,9622$ dengan nilai $k = 0,0054 \text{ menit}^{-1}$ dan $R^2 = 0,8846$, sedangkan pada $30,41 \text{ mA/cm}^2$ persamaan liniernya $y = -0,0049x + 2,687$ dengan $k = 0,0049 \text{ menit}^{-1}$ dan $R^2 = 0,988$. . Kenaikan nilai k seiring peningkatan tegangan menunjukkan bahwa laju elektrokoagulasi bertambah cepat pada tegangan yang lebih tinggi, karena semakin besar tegangan menghasilkan pembentukan koagulan Al(OH)_3 yang lebih intensif. Nilai R^2 pada ketiga variasi tegangan menandakan bahwa data eksperimen mengikuti model kinetika orde satu dengan sangat baik, sehingga hubungan linier antara $\ln C$ dan waktu kontak dapat dipercaya untuk menggambarkan perilaku penurunan konsentrasi zat warna selama proses elektrokoagulasi.



Gambar 4.13 Laju Kinetik Fotokatalis Magnetit- TiO_2 Terhadap Waktu Kontak

Gambar 4.14 menunjukkan grafik kinetika fotodegradasi zat warna metilen biru yang memenuhi orde satu berdasarkan perubahan nilai $\ln C$ terhadap waktu, baik tanpa penyinaran maupun dengan penyinaran. Berdasarkan persamaan garis pada grafik, kondisi tanpa penyinaran memiliki nilai konstanta laju (k) sebesar $0,0025 \text{ menit}^{-1}$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar $0,8326$, sedangkan dengan penyinaran diperoleh nilai k sebesar $0,0028 \text{ menit}^{-1}$ dan R^2 sebesar $0,9204$. Jika perbedaan penyisihan konsentrasi besar, maka konstanta laju reaksinya juga akan

terus membesar karena itu laju reaksi pun juga akan terus membesar (Atmadani & Hidayah, 2022).

Pada proses fotodegradasi dengan penyinaran sinar UV memberikan energi yang diperlukan agar fotokatalis TiO_2 dapat menghasilkan radikal bebas, sehingga polutan organik dapat terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan laju reaksi yang lebih tinggi. Efektivitas fotodegradasi meningkat secara signifikan, ditunjukkan oleh penurunan konsentrasi polutan yang lebih besar dan proses reaksi yang berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, pada fotodegradasi tanpa penyinaran, mekanisme utama yang terjadi adalah adsorpsi polutan pada permukaan katalis, dengan sedikit atau bahkan tidak terjadi reaksi fotokatalitik. Tanpa energi cahaya, fotokatalis tidak dapat membentuk radikal aktif sehingga laju penghilangan polutan jauh lebih lambat dan efisiensi degradasi rendah. Penurunan konsentrasi polutan lebih banyak terjadi akibat proses fisik (adsorpsi) dibandingkan reaksi kimia (Mukaromah & Maharani, 2018).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Taufik & Aziz, 2024) mengenai fotodegradasi metilen biru dengan katalis TiO_2 di bawah penyinaran UV, di mana diperoleh nilai k sebesar $0,0018 \text{ menit}^{-1}$ dan R^2 0,9994 untuk proses dengan penyinaran, menunjukkan hasil yang sejalan bahwa penyinaran meningkatkan laju serta kecocokan model kinetika.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kerapatan arus optimal yang digunakan dalam sistem elektrokoagulasi diperoleh sebesar 20 mA/cm^2 , yang mampu menghasilkan degradasi tertinggi terhadap zat warna metilen biru yaitu 27,3 %, dibandingkan variasi arus lainnya.
2. Sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dengan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ menunjukkan kemampuan yang efektif dalam menghilangkan metilen biru, terutama ketika proses fotokatalisis dilengkapi dengan penyinaran UV, terbukti dengan sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dengan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dapat menurunkan konsentrasi zat warna metilen biru sampai 72% pada waktu kontak 120 menit
3. Semakin lama waktu kontak, laju degradasi metilen biru mengikuti kinetika orde satu dengan konstanta laju reaksi (k) akan semakin tinggi. Pada proses elektrokoagulasi, nilai k maksimum sebesar $0,0054 \text{ min}^{-1}$ tercapai pada tegangan $20,25 \text{ mA/cm}^2$, sementara pada fotokatalisis dengan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--TiO}_2$, nilai k tertinggi adalah $0,0028 \text{ min}^{-1}$ di penyinaran UV. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan tegangan elektrokoagulasi dan radiasi UV pada fotokatalisis secara sinergis mempengaruhi degradasi metilen biru dalam sistem terintegrasi.

5.2 Saran

1. Penelitian ini menggunakan plat elektroda alumunium dengan jarak 5 cm, diharapkan untuk selanjutnya menggunakan jarak yang lebih dekat agar pembentukan flok bisa lebih besar.
2. Untuk meningkatkan persentrasi fotodegradasi zat warna metilen biru, penelitian selanjutnya menggunakan cermin untuk mengganti alumunium foil pada reaktor elektrokoagulasi, cermin dapat memberikan reflektor cahaya lebih baik dan seragam ke permukaan larutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhim, M. S. (2018). Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄ (Magnetit) dari Batu Besi Menggunakan Metode Kopresipitasi dengan Variasi PH. *Skripsi*, 4, 1–59.
- Agung Sri Hendarsa, Jessica Tanuwijaya, Catur Nitya V.N., H. H. S. (2013). Fotodegradasi Fenol Dengan Katalis TiO₂ P25 Berpenyangga Batu Apung. *Kimia Kemasan*, 35(1), 45–51.
- Atmadani, A. A., & Hidayah, E. N. (2022). *Kinetika Reaksi Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT) TiO₂ Sebagai Bahan Alternatif Pengolahan Limbah Cair Tahu*. 1(5), 584–594. <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i5.999>
- Cahyani, N. A., & Rosariawari, F. (2025). *Efektifitas Metode Elektrokoagulasi Dengan Penambahan Medan Magnet Dalam Menyisihkan TSS dan COD Air Limbah Industri Rumah Potong Hewan*. X(1), 11560–11570.
- Chakraborty, S., Sharmin, S., Rony, S. R., Ahmad, S. A. I., & Sohrab, M. D. H. (2018). Stability-indicating UV/vis spectrophotometric method for diazepam, development and validation. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 80(2), 366–373. <https://doi.org/10.4172/pharmaceutical-sciences.1000366>
- Daulay, L. (2021). *Pengaruh Tegangan Listrik Pada Metode Elektrokoagulasi Dalam Menjernihkan Limbah Cair Kelapa Sawit [Skripsi]*.
- Diantariani, N. P., & Santi, S. R. (2016). *PEMBUATAN KOMPOSIT ZnO-ARANG AKTIF SEBAGAI FOTOKATALIS UNTUK*. January.
- Elia, G. G., & Widayatno, R. (2020). Penurunan Kadar Cod Bod Dan Tss Limbah Cair Pabrik Tahu. *The 11th University Research Colloquium 2020 Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta*, 72–78.
- Fauziah, N. N. (2018). *Studi Penurunan Kadar Zat Warna Rodamin B Dan Metilen Biru Menggunakan Metode Elektrokoagulasi Dengan Elektroda Aluminium*. 2018.
- Gomes, J., Lincho, J., Domingues, E., Quinta-Ferreira, R. M., & Martins, R. C. (2019). N-TiO₂ photocatalysts: A review of their characteristics and capacity for emerging contaminants removal. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020373>
- Hastuti, E. (2012). *Analisa Difraksi Sinar X TiO₂ Dalam Penyiapan Bahan Sel*

- Surya Tersensitisasi Pewarna. *Jurnal Neutrino*, 2010, 93–100.
<https://doi.org/10.18860/neu.v0i0.2416>
- Hevira, L., Zein, R., & Ramadhani, P. (2019). Review Metoda Adsorpsi Pada Penyerapan Ion Logam Dan Zat Warna Dalam Limbah Cair Adsorption Methods For Metal Ion Adsorption And Dyes In Liquid Waste Metoda Adsorpsi Pada Penyerapan Ion Logam Dan Zat Warna. *Jurnal Sains Dan Terapan Kimia*, 13(1), 39–58.
- Husein, M. (2023). Intensitas Paparan Sinar Uv Terhadap Tajam Penglihatan Pada Pengemudi Ojek Online Di Ciputat Timur 2022. *Jurnal Hasil Penelitian Dan Pengkajian Ilmiah Eksakta*, 2(1), 149–160.
- Ibrahim, I., Setiawan, Y., Rahayu, D. E., & Surya, R. A. (2023). Uji Kinerja Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Alumunium (Al) Untuk Penyisihan Logam Fe Dan Mn Pada Air Bersih Berdasarkan Efisiensi Penyisihan Dan Konsumsi Energi. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 7(1), 31.
<https://doi.org/10.30872/jtlunmul.v7i1.11320>
- Indrawati, T., Siswanto, & Taufiqu Rochman, N. (2013). Ekstraksi Titanium Dioksida (TiO₂) Berbahan Baku Limbah Peleburan Pasir Besi. *Journal UNAIR*, 1–15.
- Irawan, D., Arifin, Z., & Maulidya, E. (2016). Proses Penurunan Zat Warna dalam Limbah Cair Industri Sarung Samarinda dengan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 6(11), 31.
<https://doi.org/10.26578/jrti.v6i11.1505>
- Islammiyati, A., Azwar, A., & Asri, A. (2022). Studi Pengaruh Penyinaran Lampu Ultraviolet pada Kinerja Fotodegradasi Metilen Biru Berfotokatalis TiO₂. 10(3), 430–435.
- Mahreni, Ristianingsih, Y., & Saepudin, A. (2021). Aplikasi Katalis Kerangka Logam Organik pada Fotokatalis. In *Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condong Catur, Yogyakarta, 55283 Telp. (0274) 486188, 486733, fax. (0274) 486400*.
- Maryudi, M., Aktawan, A., & Amelia, S. (2021). Pengolahan Limbah Pewarna Metilen Biru Menggunakan Arang Aktif dan Zeolit Aktif dengan Katalis Fe

- dan Oksidator Hidrogen Peroksida. *Jurnal Riset Kimia*, 12(2).
<https://doi.org/10.25077/jrk.v12i2.414>
- Maylani, A. S., Sulistyaningsih, T., & Kusumastuti, E. (2016). Preparasi Nanopartikel Fe₃O₄ (Magnetit) Serta Aplikasinya Sebagai Adsorben Ion Logam kadmium. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 5(2), 130–135.
<http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs%0APREPARASI>
- Mukaromah, A. ., & Maharani, E. T. (2018). *Perbedaan Degradasi ION Cr(VI) Dengan Penyinaran UV DAN Tanpa Penyinaran UV*. 2018.
- Nengsih, S., Abdulmadjid, S. N., Mursal, M., Idroes, R., & Jalil, Z. (2023). Magnetization Study of Iron Sand from Sabang, Indonesia: The Potential of Magnetic Materials in the Photocatalytic Field. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 18(2), 344–352.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.19041>
- Nugroho, S., Meicahayanti, I. K. A., & Putri, A. A. D. I. (2024). Pengaruh Waktu Kontak dan Jenis Pasangan Elektroda Dalam Proses Elektrokoagulasi Terhadap pH dan TSS Air Asam Tambang. 12(1), 37–49.
- Padmaningrum, R. T., & Marwati, S. (2015). Validasi Metode Analisis Siklamat Secara Spektrofotometri Dan Turbidimetri. *J. Sains Dasar*, 4(1), 23–29.
- Priatmoko, S., & Wahyuni, S. (2021). Fotokatalis Ni-N-TiO₂ untuk Degradasi Metilen Biru. *Inovasi Sains Dan Kesehatan*, 5, 120–165.
- Raganata, T. C., Aritonang, H., & Suryanto, E. (2020). Sintesis Fotokatalis Nanopartikel ZnO Untuk Mendegradasi Zat Warna Methylene Blue. *Chemistry Progress*, 12(2), 54–58.
<https://doi.org/10.35799/cp.12.2.2019.27923>
- Rahayu, N. A. I., Sylvia, N., Bahri, S., Meriatna, M., & Muarif, A. (2022). Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Adsorben Dari Ampas Teh Pada Kolom. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 2(2), 75.
<https://doi.org/10.29103/cejs.v2i2.7030>
- Rahman, T., Fadhlulloh, M. A., Nandiyanto, A. B. D., & Mudzakir, A. (2014). Review : Sintesis Titanium Diokasida Nanopartikel. *Jurnal Integrasi Proses*, 5(1), 15–29.
- Riskiani, E., Suprihatin, I. E., & Sibarani, J. (2019). Fotokatalis Bentonit-Fe₂O₃

- untuk Degradation Zat Warna Remazol Brilliant Blue. *Cakra Kimia*, 7(1), 46–54.
- Safaat, M. (2020). Potensi Logam Oksida Sebagai Fotokatalis Degradasi Plastik Di Air Laut. *Oseana*, 45(1), 40–58.
<https://doi.org/10.14203/oseana.2020.vol.45no.1.54>
- Said, A. (2021). Degradasi Pewarna Tartrazin dengan Fotokatalis Titanium Dioksida (TiO₂). *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, 3(1), 21–27.
- saputra. (2022). *Studi Kinetika Pada Proses Elektrokoagulasi Zat Warna Metilen Biru*. 3, 1–11.
- Sari, M. I. (2019). Pengaruh Penambahan TiO₂-Powder Terhadap Kandungan Cod Pada Limbah Sintetis C.I. Reactive Red 2 Dengan Metode Fotokatalisis. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 10(01), 4–12.
<https://doi.org/10.52506/jtpa.v10i01.81>
- Setiawan, M. P., Kimia, J., Hindryawati, N., & Aziz, A. (2024). Mini Review: Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel ZnO Dan Aplikasinya Sebagai Fotokatalis. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, 2(2), 84–90.
- Silvia Permatasari, O., Wardhani, S., & Darjito. (2015). Studi Pengaruh Penambahan H₂O₂ Terhadap Degradasi Metyl Orange Menggunakan Fotokatalis TiO₂-N. *Kimia Student Journal*, 1(1), 661–667.
- Sucahya, T. N., Permatasari, N., Bayu, A., & Nandiyanto, D. (2016). Fotoktalis untuk Pengolahan Limbah Cair. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(1), 1–15.
- Syam, B., & Widiyandari, H. (2014). Sintesis Film Tungsten Oksida (WO₃) Dengan Penambahan Metal Co-Katalis Besi (Fe) Dan Aplikasinya Pada Peningkatan Aktivitas Fotokatalitik Degradasi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Cahaya Matahari. *Youngster Physics Journal*, 2(1), 15–24.
- Tati Suharti. (2019). Dasar-dasar Spektrofotometri UV-VIS dan spektrofotometri massa untuk penentuan struktur senyawa organik. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14.
http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI

- Taufik, I., & Aziz, A. (2024). *Degradasi Fotokatalitik Senyawa Metilen Biru Dengan Katalis Titania Nanotube*. 48(283), 53–60.
- Taurina, A. P., Iftikhar, B. F., Syaifudin, M., & Sumarsono, R. (2023). *Sintesis Senyawa Mg / Al-NO 3 Hidrotalsit dengan Metode Kopresipitasi*. 3(3), 251–263. <https://doi.org/10.17977/um067v3i6p251-263>
- Tussa'adah, R., & Astuti. (2015). Sintesis Magterial Fotokatalis TiO₂ untuk Penjernihan Limbah Tekstil. *Jurnal Fisika Unand*, 4(1), 91–96.
- Wardhani, S., Bahari, A., & Misbah Khunur, M. (2016). Aktivitas Fotokatalitik Beads TiO₂-N/Zeolit-Kitosan Pada Fotodegradasi Metilen Biru (Kajian Pengembangan, Sumber Sinar Dan Lama Penyinaran). *Journal of Enviromental Engineering and Sustainable Technology*, 3(2), 78–84. <https://doi.org/10.21776/ub.jeest.2016.003.02.2>
- Yanto Rahman, D., & Sulistyowati, R. (2023). Aplikasi Fotokatalis Tio₂ Dan Alternatifnya Untuk Degradasi Pewarna Sintetis Dalam Limbah Cair. *Environmental Science Journal (ESJo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, 1(2), 89–105. <http://journal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/esjo>
- Yusbarina, & Buchari. (2014). Optimasi Kerapatan Arus Dan Waktu Elektrolisis Dalam Pengolahan Limbah Surfaktan Secara Elektrokoagulasi. *Photon: Jurnal Sain Dan Kesehatan*, 4(2), 73–77. <https://doi.org/10.37859/jp.v4i2.184>
- Zaman, Q., Johan, F., & Nugroho, H. (2022). Mendukung Industri Pertahanan dengan Analisa Proses Pengolahan Besi Spons dari Pasir Besi sebagai Bahan Baja. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, 3(6), 17–27.

جامعة الرانري

A R - R A N I R Y

LAMPIRAN I

PERHITUNGAN

1) Konsentrasi Larutan Standar Metilen Biru

Larutan standar metilen biru dibuat dengan konsentrasi sebesar 20 ppm untuk dapat digunakan sebagai larutan yang didegradasi dengan menggunakan metode elektrokoagulasi. Rumus pengenceran digunakan untuk mengencerkan larutan metilen biru dengan konsentrasinya 5000 ppm ke 20 ppm, berikut merupakan hasil konsentrasi larutan metilen biru 20 ppm menggunakan rumus pengenceran.

$$V1 \times M1 = V2 \times M2$$

$$V1 \times 5000 = 20 \text{ ppm} \times 5000 \text{ ml}$$

$$V1 = \frac{20 \text{ ppm} \times 5000 \text{ ml}}{5000 \text{ ppm}}$$

$$V1 = \frac{100.000}{5000}$$

$$V1 = 20 \text{ ml}$$

Sehingga untuk mendapatkan konsentrasi 20 ppm perlu dititrisi sebanyak 20ml dari larutan metilen biru dengan konsentrasi 5000 ppm.

2) Penentuan Kurva Standar Metilen Biru

Absorbansi larutan standar metilen biru dengan konsentrasi awal 20 ppm telah diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Perhitungan konsentrasi setelah fotodegradasi menggunakan rumus sebagai berikut:

Diketahui: $y = ax + b$

$$x = \frac{y - b}{a} = \frac{y - 0,2323}{0,1628}$$

Dimana x = Konsentrasi setelah fotodegradasi

y = Nilai absorbansi

$$a = 0,1628$$

$$b = 0,2323$$

a) Elektrokoagulasi pada tegangan 10,08 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 Menit

$$x = \frac{y - b}{a}$$

$$= \frac{3,14 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 17,9 \text{ ppm}$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 Menit

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{3,11 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 17,7 \text{ ppm}$$

b) Elektrokoagulasi pada tegangan 20,25 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 menit

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{2,74 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 15,4 \text{ ppm}$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 Menit

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{2,60 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 14,5 \text{ ppm}$$

c) Elektrokoagulasi pada tegangan 30,41 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 menit

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{2,97 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 16,8 \text{ ppm}$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 menit

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{2,65 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 14,9 \text{ ppm}$$

d) Fotodegradasi zat warna metilen biru dari hasil terbaik

1) Fotodegradasi 30 menit menggunakan sinar UV

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{1,38 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 7,11 \text{ ppm}$$

2) Fotodegradasi 60 menit menggunakan sinar UV

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{1,37-0,2323}{0,1628} \\ &= 7,02 \text{ ppm} \end{aligned}$$

3) Fotodegradasi 90 menit menggunakan sinar UV

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{1,25-0,2323}{0,1628} \\ &= 6,26 \text{ ppm} \end{aligned}$$

4) Fotodegradasi 120 menit menggunakan sinar UV

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{1,14-0,2323}{0,1628} \\ &= 5,60 \text{ ppm} \end{aligned}$$

5) Fotodegradasi 30 menit tanpa penyinaran

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{2,20-0,2323}{0,1628} \\ &= 12,12 \text{ ppm} \end{aligned}$$

6) Fotodegradasi 60 menit tanpa penyinaran

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{2,10-0,2323}{0,1628} \\ &= 11,17 \text{ ppm} \end{aligned}$$

7) Fotodegradasi 90 menit tanpa penyinaran

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-b}{a} \\ &= \frac{2,07-0,2323}{0,1628} \\ &= 11,3 \text{ ppm} \end{aligned}$$

8) Fotodegradasi 120 menit tanpa penyinaran

$$x = \frac{y-b}{a}$$

$$= \frac{1,77 - 0,2323}{0,1628}$$

$$= 9,47 \text{ ppm}$$

3) Perhitungan Persen degradasi Metilen Biru

Hasil dari presentase degradasi metilen biru menggunakan sistem terintegrasi elektrokoagulasi-fotokatalisis dihitung dengan menggunakan dengan rumus sebagai berikut:

$$\% D = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

% D = Persen degradasi

C₀ = Konsentrasi sebelum eksperimen

C_t = Konsentrasi setelah eksperimen

a) Elektrokoagulasi pada tegangan 10,08 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 menit

$$\% D = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 17,9]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 10,7 \%$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 menit

$$\% D = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 17,7]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 11,7 \%$$

b) Elektrokoagulasi pada tegangan 20,25 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 menit

$$\% D = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 15,4]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 23 \%$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 menit

$$\% D = \frac{[C_0 - C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 14,5]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 27,3 \%$$

c) Elektrokoagulasi pada tegangan 30,41 mA/cm²

1) Elektrokoagulasi pada waktu 30 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 16,8]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 16 \%$$

2) Elektrokoagulasi pada waktu 60 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 14,9]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 25,8 \%$$

d) Persen Fotodegradasi zat warna metilen biru dari hasil terbaik

1) Fotodegradasi menggunakan sinar UV pada waktu 30 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 7,11]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 64,45 \%$$

2) Fotodegradasi menggunakan sinar UV pada waktu 60 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 7,02]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 64,9 \%$$

3) Fotodegradasi menggunakan sinar UV pada waktu 90 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 6,26]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 68,70 \%$$

4) Fotodegradasi menggunakan sinar UV pada waktu 120 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20 - 5,6]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 72 \%$$

5) Fotodegradasi tanpa penyinaran pada waktu 30 menit

$$\% D = \frac{[Co - Ct]}{Co} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20-12,12]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 39,4 \%$$

6) Fotodegradasi tanpa penyinaran pada waktu 60 menit

$$\% D = \frac{[C_0-C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20-11,47]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 42,65 \%$$

7) Fotodegradasi tanpa penyinaran pada waktu 90 menit

$$\% D = \frac{[C_0-C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20-11,3]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 43,5 \%$$

8) Fotodegradasi tanpa penyinaran pada waktu 120 menit

$$\% D = \frac{[C_0-C_t]}{C_0} \times 100\%$$

$$\% D = \frac{[20-9,47]}{20} \times 100\%$$

$$\% D = 52,65 \%$$

4) **Perhitungan Nilai Rapat Arus Elektrokoagulasi**

Untuk menentukan nilai rapat arus digunakan pendekatan Hukum Ohm dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$R = \rho \times \frac{d}{A}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$J = \frac{I}{A}$$

Keterangan :

R = Hambatan (Ohm)

I = Arus Total (A)

J = Rapat Arus (mA/cm²)

ρ = resistivitas larutan (ohm·cm)

d = jarak antar elektroda (cm)

A = Luas Permukaan Elektroda (cm²)

V = Tegangan Listrik

1) Tegangan 10 Volt

$$\begin{aligned} R &= \rho \times \frac{L}{A} \\ &= 200 \times \frac{5}{120} \\ &= 8,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{10}{8,2} \\ &= 1,21 \text{ A (1.210 mA)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{I}{A} \\ &= \frac{1.210}{120} \\ &= 10,08 \text{ mA/cm}^2 \end{aligned}$$

2) Tegangan 20 Volt

$$\begin{aligned} R &= \rho \times \frac{L}{A} \\ &= 200 \times \frac{5}{120} \\ &= 8,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{20}{8,2} \\ &= 2,43 \text{ A (2.430 mA)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{I}{A} \\ &= \frac{2.430}{120} \\ &= 20,25 \text{ mA/cm}^2 \end{aligned}$$

3) Tegangan 30 Volt

$$\begin{aligned} R &= \rho \times \frac{L}{A} \\ &= 200 \times \frac{5}{120} \\ &= 8,2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ &= \frac{30}{8,2} \end{aligned}$$

$$= 3,65 \text{ A (3.650 mA)}$$

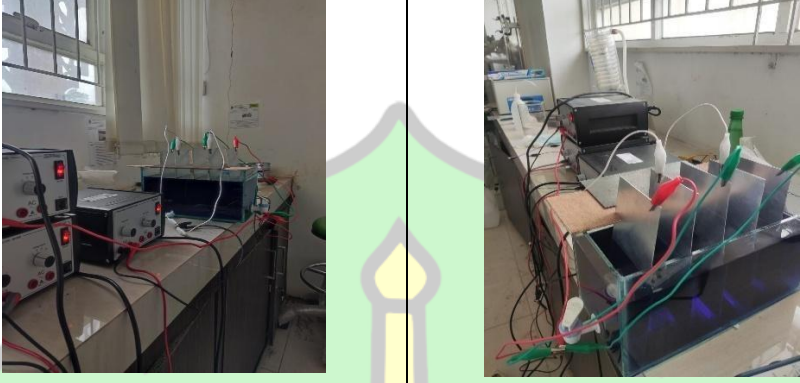
$$\begin{aligned} J &= \frac{I}{A} \\ &= \frac{3.650}{120} \\ &= 30,41 \text{ mA/cm}^2 \end{aligned}$$



LAMPIRAN II

DOKUMENTASI PENELITIAN

Degradasi zat warna menggunakan metode elektrokoagulasi

	
Proses elektrokoagulasi	
	
Sampel metilen biru sebelum elektrokoagulasi	
	
Setelah elektrokoagulasi 30 menit pada tegangan $10,08 \text{ mA/cm}^2$	Setelah elektrokoagulasi 60 menit pada tegangan $10,08 \text{ mA/cm}^2$

Setelah elektrokoagulasi 30 menit pada tegangan 20,25 mA/cm²	Setelah elektrokoagulasi 60 menit pada tegangan 20,25 mA/cm²
Setelah elektrokoagulasi 30 menit pada tegangan 30,41 mA/cm²	Setelah elektrokoagulasi 60 menit pada tegangan 30,41 mA/cm²

Tahap sintesis magnetit (Fe₃O₄) dengan metode kopresipitasi

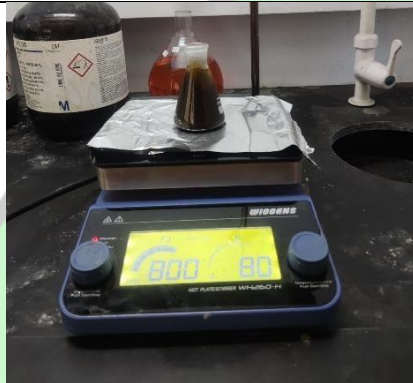
Proses penghalusan pasir besi	Proses pengayakan pasir besi



Penimbangan pasir besi



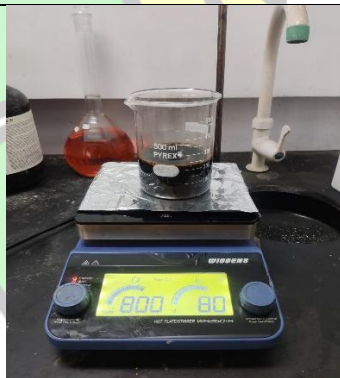
Penambahan pasir besi dengan HCL



Proses pengadukan dan memanaskan pasir besi dan HCL



Proses penyaringan larutan pasir besi dan HCL



Proses pengadukan dan penggabungan pasir besi dengan amonia



Proses pencucian pasir besi setelah pengadukan

Proses Penggabungan Fe_3O_4 - TiO_2

	
Magnetit pasir besi	TiO_2
	
Proses penggabungan magnetit pasir besi dengan TiO_2 menggunakan shaker	Magnetit yang sudah digabung dengan TiO_2

Fotodegradasi zat warna metilen biru menggunakan katalis Fe_3O_4 - TiO_2

	
Sampel fotokatalisis dengan penyinaran sinar UV 30,60,90,120 menit	Sampel fotokatalisis tanpa penyinaran 30,60,90,120 menit

